

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2000-097742

(43)Date of publication of application : 07.04.2000

(51)Int.Cl.

G01F 1/66

G01P 5/00

(21)Application number : 10-272359

(71)Applicant : TOKYO ELECTRIC POWER CO  
INC:THE

(22)Date of filing : 25.09.1998

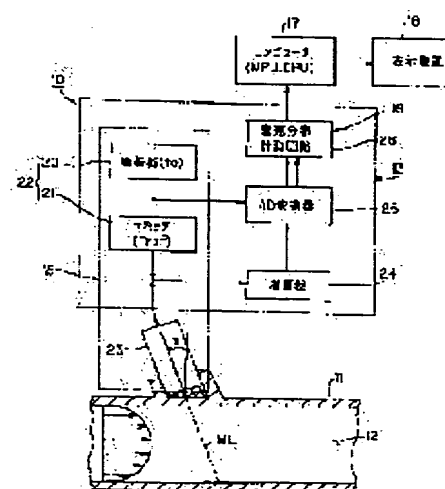
(72)Inventor : MORI HARUTSUGU  
TAKEDA YASUSHI

## (54) DOPPLER-TYPE ULTRASONIC FLOWMETER

## (57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a Doppler-type ultrasonic flowmeter which can measure a flow rate from a flow velocity distribution of a fluid to be measured highly accurately, time-dependently and correctly by utilizing Doppler shift of ultrasonic waves not only in a steady state but also in a non-steady state.

SOLUTION: The Doppler-type ultrasonic flowmeter includes an ultrasonic wave transmission means 15 for making ultrasonic pulses of required frequency  $f_0$  incident to a fluid to be measured along a measurement line ML from an ultrasonic transducer 23, a fluid velocity distribution measurement means 16 for receiving ultrasonic echoes reflected from a measurement range among the ultrasonic pulses which are incident to the fluid 12 to be measured and measuring a flow velocity distribution of the fluid 12 in the measurement region, and a flow rate calculation means 17 for calculating an equation where a flow rate is  $m(t)$  based on the flow velocity distribution of the fluid 12. The flow rate calculation means 17 is designed to measure a flow rate based on the flow velocity distribution of the fluid 12 in the measurement region.



$$m(t) = \rho \int_{-L}^{+L} v(x,t) dx$$

但し、 $\rho$  : 流体の密度

$v(x,t)$  : 時刻  $t$  における流速

## LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 13.02.2001

[Date of sending the examiner's decision of rejection] 08.10.2002

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision] 2002-21681

of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection] 07.11.2002

[Date of extinction of right]

## \* NOTICES \*

JPO and NCIP are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.

2.\*\*\* shows the word which can not be translated.

3.In the drawings, any words are not translated.

---

CLAIMS

---

[Claim(s)]

[Claim 1] It is [Equation 1] when setting a flow rate to  $m(t)$  based on a fluid velocity-distribution measurement means receives the ultrasonic echo reflected from the measurement field among an ultrasonic transmitting means carry out incidence of the ultrasonic pulse of a necessary frequency into a measured fluid along with a measurement line from an ultrasonic transducer, and the ultrasonic pulse by which incidence was carried out to the measured fluid, and measure the velocity distribution of the measured fluid in a measurement field, and the velocity distribution of the above-mentioned measured fluid.

$$m(t) = \rho \int v(x \cdot t) \cdot dA$$

但し、 $\rho$  : 被測定流体の密度

$v(x \cdot t)$  : 時間  $t$  における速度成分

The Doppler type ultrasonic flowmeter characterized by having a flow rate operation means to perform \*\*\*\*\*, and measuring the flow rate of the measured fluid in said measurement field with the above-mentioned flow rate operation means.

[Claim 2] it be [Equation 2] when set the flow rate of the measure fluid with which said flow rate operation means flow the inside of said piping while be arrange so that a measure fluid may be flowing fluid about piping, and the ultrasonic transducer of  $N$  individual ( $N \geq 1$ ) may set spacing to the periphery side of piping in a hoop direction and the measurement line of the ultrasonic pulse transmit may pass along the predetermined point on the medial axis line of piping to  $m(t)$ .

$$m(t) = \rho \int \int v_x(r \cdot \theta \cdot t) \cdot r \cdot dr \cdot d\theta$$

$$\approx \rho \sum_{i=1}^N \frac{\pi}{N} \int v_x(r \cdot \theta \cdot t) \cdot r \cdot dr$$

但し、 $v_x(r \cdot \theta \cdot t)$  : 時間  $t$  における配管横断面上の管軸方向の速度成分

The Doppler type ultrasonic flowmeter according to claim 1 set up so that \*\*\*\*\* might be performed.

[Claim 3] The ultrasonic pulse transmitted from an ultrasonic transmitting means is the Doppler type ultrasonic flowmeter according to claim 1 with which the fundamental frequency which produces a resonance-transparency phenomenon to the wall thickness of piping was chosen.

[Claim 4] An ultrasonic transducer sets necessary spacing to the hoop direction of piping, and the measurement line of the ultrasonic pulse emitted from each ultrasonic transducer while preparing is a Doppler type ultrasonic flowmeter according to claim 1 or 2 which only the include angle  $\alpha$  was made to incline to the radiation direction of piping, and has been arranged  $N$  individual ( $N \geq 2$ ).

[Claim 5] A measurement field is a Doppler type ultrasonic flowmeter according to claim 1 arranged so that at least two ultrasonic transducers to which it is a 2-dimensional flat surface and incidence of the ultrasonic pulse is carried out along the above-mentioned measurement

field may be prepared and the measurement line by the ultrasonic pulse from one ultrasonic transducer may cross once [ at least ] in the measurement line and said measurement field from an ultrasonic transducer of another side.

[Claim 6] Three ultrasonic transducers which three ultrasonic transducers to which it is a 2-dimensional flat surface and incidence of the ultrasonic pulse is carried out along the above-mentioned measurement field make a group at a time, and 2 or more sets of measurement fields are prepared, and constitute the above-mentioned group are Doppler type ultrasonic flowmeters according to claim 1 arranged so that it may cross by one on said measurement field.

---

[Translation done.]

\* NOTICES \*

JPO and NCIP are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

- 1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
- 2.\*\*\*\* shows the word which can not be translated.
- 3.In the drawings, any words are not translated.

---

DETAILED DESCRIPTION

---

[Detailed Description of the Invention]

[0001]

[Field of the Invention] This invention relates to the Doppler type ultrasonic flowmeter which is applied to the Doppler type ultrasonic flowmeter which measures the flow rate of a measured fluid using the doppler shift of a supersonic wave, especially measures the flow rate of a measured fluid by the time-dependent from the velocity distribution of a measurement field in an instant.

[0002]

[Description of the Prior Art] It is divided roughly into the flowmeter which measures the flow rate of the measured fluid which flows the inside of piping by two kinds by the measurement principle.

[0003] The 1st flowmeter measures a flow rate using the amount of processes of flowing fluid changing the inside of piping to a flow direction, and there is an orifice meter in this kind of flowmeter. An orifice meter measures a flow rate by the orifice upstream and the downstream using the pressures of a fluid differing, and calls such a flow rate measurement approach "average approximation" below.

[0004] The 2nd flowmeter is mainly used for the hydrometry of the flow in piping, such as a tube.

[0005] The rate of flow of an one point of the flow in piping, for example, the predetermined point on a tube axis, is measured, the velocity-distribution configuration in piping is assumed from a theoretical value based on the obtained measured value, this flowmeter is integrated with this velocity-distribution configuration, and a flow rate is calculated. Such a hydrometry approach is called "approximation integration" below.

[0006] The ultrasonic flowmeter which irradiates a supersonic wave at the measured fluid which is the measuring object, and measures the flow rate of a fluid in a flowmeter on the other hand is known.

[0007] It is divided roughly into what measures a flow rate by average approximation in this ultrasonic flowmeter, and the thing which measures a flow rate by approximation integration.

[0008] The ultrasonic flowmeter which adopted average approximation is with the case where an ultrasonic pulse progresses towards the upstream of the flow of a fluid in the time amount taken for an ultrasonic pulse to pass through for two points of fixed spacing, and that case where it progresses towards the lower stream of a river of flow conversely, it uses that only the rates of the flow of a fluid differ, asks for the mean velocity for two predetermined points, and measures a flow rate.

[0009] Moreover, the ultrasonic flowmeter which adopted approximation integration finds the rate of the measured fluid of one on the medial axis of piping using the doppler shift method, measures a flow rate from this fluid rate, and has some which were indicated by JP,6-294670,A. The ultrasonic flowmeter of this approximation integration is integrated in quest of the form of a velocity distribution from a theoretical value or a rule of thumb. For example, in the laminar-flow field in piping, since a velocity distribution appears in a parabola, it can calculate a flow rate by using the boundary condition in a tube wall using the fluid rate measured on the medial axis.

Since this theoretical solution is strictly materialized to the flow of a steady state, the ultrasonic flowmeter of approximation integration can be applied only to the flow of a steady state, and cannot respond to the flow of an unstationary state.

[0010] Generally, the flow of viscous fluid is well known as an equation of Navia SUTOUSUKU (Navier-Stokes:NS). The conventional ultrasonic flowmeter disregards the time amount differential term of a NS equation, and is calculating the flow rate using the knowledge of flow distribution over a steady state. For this reason, a flow rate is changed in time, when the flowing space (flow field of a fluid) where approximation integration is not enacted is the measuring object, the accuracy of measurement falls remarkably or there is a possibility that the effectiveness of a measurement result may be spoiled.

[0011] The flowing space where the fluctuation time amount of a flow rate system is shorter than time amount required as such flowing space to take out an average stream flow, and the flowing space where flow is not fully developed are mentioned. In the case of the former, the time amount differential term of a NS equation does not become zero, and, in the case of the latter, single dimension approximation of a NS equation is not materialized.

[0012]

[Problem(s) to be Solved by the Invention] Since it was flow rate measurement of the flow of a steady state while it is necessary to take the very long in-run who develops flow into the upstream of for example, a measurement part and the conventional flowmeter takes time amount, cost, and an effort in a piping facility, in order to be flow rate measurement in a steady state and to perform hydrometry in sufficient precision, it was difficult to perform flow rate measurement of the flow of an unstationary state.

[0013] Moreover, since the conventional flowmeter makes the average stream flow of flowing fluid the measuring object for the inside of closed piping, such as a tube, it cannot measure the local flow rate of a bigger flow rate system. For example, the characteristic flow rate measurement accompanied by the time variation near the inlet port of a very big mixing vessel or near an outlet was not able to be measured in which flowmeter.

[0014] By the way, to the flow of the measured fluid in the flow rate place of three-dimensions space being expressed with the vector quantity of three dimensions, in piping, the conventional flowmeter assumes the flow of a single dimension and performs flow rate measurement. For this reason, even if it is in closed piping, when flow is in three dimensions, the accuracy of measurement of a flow rate gets very bad, or becomes impossible. For example, immediately after piping bent like elbow piping or U character-like reversal piping, the flow of a fluid is in three dimensions according to a centrifugal-force operation, and even if it installs the conventional flowmeter in such a location, flow rate measurement cannot be performed on an effective target.

[0015] This invention was made in consideration of the situation mentioned above, and aims at offering the Doppler type ultrasonic flowmeter which can measure the flow rate of a measured fluid with a sufficient precision correctly by the time-dependent using the doppler shift of a supersonic wave even if it is the flow of not only the flow of a steady state but an unstationary state.

[0016] Other purposes of this invention measure the velocity distribution of the measured fluid which flows the inside of piping, and are to offer the Doppler type ultrasonic flowmeter which is excellent in responsibility and can measure the flow rate of the transient changed in time with a sufficient precision by non-contact.

[0017] The purpose of further others of this invention is to offer the Doppler type ultrasonic flowmeter which can measure the flow rate of a measured fluid with a sufficient precision efficiently also in the location where the part where the flow of a fluid is not fully developed, and flow are three dimensions in an instant.

[0018] Moreover, another purpose of this invention is to offer the Doppler type ultrasonic flowmeter which can measure partially some flow rates of the flow rate system which flows big space.

[0019] Even if still more nearly another purpose of this invention is the opaque or translucent fluid which cannot apply the optical hydrometry approach, it is to offer the Doppler type

ultrasonic flowmeter which can measure a flow rate with a sufficient precision correctly.

[0020]

[Means for Solving the Problem] In order that the Doppler type ultrasonic flowmeter concerning this invention may solve the technical problem mentioned above An ultrasonic transmitting means to carry out incidence of the ultrasonic pulse of a necessary frequency into a measured fluid along with a measurement line from an ultrasonic transducer as indicated to claim 1, It is [Equation 3] when setting a flow rate to  $m(t)$  based on a fluid velocity-distribution measurement means to receive the ultrasonic echo reflected from the measurement field among the ultrasonic pulses by which incidence was carried out to the measured fluid, and to measure the velocity distribution of the measured fluid in a measurement field, and the velocity distribution of the above-mentioned measured fluid.

$$m(t) = \rho \int v(x \cdot t) \cdot dA$$

但し、 $\rho$  : 被測定流体の密度

$v(x \cdot t)$  : 時間  $t$  における速度成分

It has a flow rate operation means to perform \*\*\*\*\*, and the flow rate of the measured fluid in said measurement field is measured with the above-mentioned flow rate operation means.

[0021] In order that the Doppler type ultrasonic flowmeter concerning claim 2 may solve the technical problem mentioned above A measured fluid is flowing fluid about piping, and the ultrasonic transducer of  $N$  individual ( $N \geq 1$ ) sets spacing to the periphery side of piping in a hoop direction. And it is [Equation 4] when setting the flow rate of the measured fluid with which said flow rate operation means flows the inside of said piping while being arranged so that the measurement line of the ultrasonic pulse transmitted may pass along the predetermined point on the medial-axis line of piping to  $m(t)$ .

$$m(t) = \rho \int \int v_x(r \cdot \theta \cdot t) \cdot r \cdot dr \cdot d\theta$$

$$\approx \rho \sum_{i=1}^N \frac{\pi}{N} \int v_x(r \cdot \theta \cdot t) \cdot r \cdot dr$$

但し、 $v_x(r \cdot \theta \cdot t)$  : 時間  $t$  における配管横断面上の管軸方向の速度成分

It is set up so that \*\*\*\*\* may be performed.

[0022] In order that the Doppler type ultrasonic flowmeter concerning claim 3 may solve the technical problem mentioned above, the fundamental frequency which the ultrasonic pulse transmitted from an ultrasonic transmitting means makes produce a resonance-transparency phenomenon to the wall thickness of piping is chosen.

[0023] In order that the Doppler type ultrasonic flowmeter concerning claim 4 may solve the technical problem mentioned above, while an ultrasonic transducer sets necessary spacing to the hoop direction of piping and prepares it in it  $N$  individual ( $N \geq 2$ ), the measurement line of the ultrasonic pulse emitted from each ultrasonic transducer makes only an include angle  $\alpha$  incline to the radiation direction of piping, and is arranged.

[0024] In order that the Doppler type ultrasonic flowmeter concerning claim 5 may solve the technical problem mentioned above, a measurement field is a 2-dimensional flat surface, it prepares at least two ultrasonic transducers to which incidence of the ultrasonic pulse is carried out along the above-mentioned measurement field, and it arranges them so that the measurement line by the ultrasonic pulse from one ultrasonic transducer may cross once [ at least ] in the measurement line and said measurement field from an ultrasonic transducer of another side.

[0025] In order that the Doppler type ultrasonic flowmeter concerning claim 6 may solve the technical problem mentioned above, three ultrasonic transducers to which it is a 2-dimensional flat surface and incidence of the ultrasonic pulse is carried out along the above-mentioned measurement field make a group at a time, 2 or more sets of measurement fields are prepared, and three ultrasonic transducers which constitute the above-mentioned group cross by one on

said measurement field.

[0026]

[Embodiment of the Invention] The gestalt of operation of the Doppler type ultrasonic flowmeter concerning this invention is explained with reference to an accompanying drawing.

[0027] Drawing 1 is drawing showing the 1st operation gestalt of the Doppler type ultrasonic flowmeter concerning this invention. The Doppler type ultrasonic flowmeter 10 measures the velocity distribution of the measured fluids 12, such as a liquid which flows the inside of piping 11, and a gas, and measures a flow rate by the time-dependent in an instant.

[0028] The Doppler type ultrasonic flowmeter 10 is equipped with the ultrasonic velocity-distribution measurement unit (henceforth a UVP unit) 13 which measures the rate of flow of the measured fluid 12 which flows the inside of piping 11 by non-contact. An ultrasonic transmitting means 15 by which the UVP unit 13 makes the ultrasonic pulse of a necessary frequency (fundamental frequency  $f_0$ ) transmit to the measured fluid 12 along with the measurement line ML. A fluid velocity-distribution measurement means 16 to receive the ultrasonic echo reflected from the measurement field of the ultrasonic pulse by which incidence was carried out to the measured fluid 12, and to measure the velocity distribution of the measured fluid 12 in a measurement field. The computers 17, such as a microcomputer as a flow rate operation means to carry out data processing based on the velocity distribution of the measured fluid 12, to integrate with radial, and to calculate the flow rate of the measured fluid 12 by the time-dependent, and CPU, MPU, It has the display 18 which can be displayed serially for the output from this computer 17.

[0029] The ultrasonic transmitting means 15 is the fundamental frequency  $f_0$ , such as a necessary frequency, for example, 1MHz, 2MHz, and 4 etc.MHz. It has the signal generator 22 which consists of an oscillator (oscillator) 20 made to generate an electrical signal and an emitter 21 (frequency  $F_{rpf}$ ) which outputs the electrical signal from this oscillator 20 in the shape of a pulse to predetermined every time interval ( $1/F_{rpf}$ ), and is fundamental frequency  $f_0$  from this signal generator 22. A pulse electrical signal is inputted into the ultrasonic transducer 23. The ultrasonic transducer 23 is fundamental frequency  $f_0$  by impression of a pulse electrical signal. An ultrasonic pulse is made to send along with the measurement line ML. An ultrasonic pulse is a beam of rectilinear-propagation nature which has almost no flare with the pulse width of about 5mm.

[0030] The ultrasonic transducer 23 serves as the transceiver machine, and the ultrasonic transducer 23 receives the ultrasonic echo in which the sent ultrasonic pulse is reflected in the reflector in a fluid. A reflector is a foreign matter with which it is the air bubbles uniformly contained in the measured fluid 12, or is particle, such as impalpable powder of aluminum, or acoustic impedances differ in the measured fluid 12.

[0031] The ultrasonic echo received by the ultrasonic transducer 23 is changed into an echo electrical signal by this transducer 23. After this echo electrical signal is amplified with an amplifier 24, it is digitized through A-D converter 25, and this digital echo signal is inputted into the velocity-distribution measurement circuit 26. In the velocity-distribution measurement circuit 26, it is the fundamental frequency  $f_0$  from an oscillator 20. An electrical signal is digitized, it is inputted, change of the rate of flow based on a doppler shift is measured from the delta frequency of both signals, and the velocity distribution of the measurement field which meets the measurement line ML is computed. The velocity distribution in the cross section of piping 11 is measurable by proofreading the velocity distribution of a measurement field with the tilt angle  $\alpha$ .

[0032] Next, with reference to drawing 2, the working principle of the Doppler type ultrasonic flowmeter 10 is explained.

[0033] As shown in drawing 2 (A), after only the include angle  $\alpha$  has leaned and installed the ultrasonic transducer 23 in the flow direction of the measured body to the radiation direction of piping 11 The ultrasonic transducer 23 to necessary frequency  $f_0$  When incidence of the ultrasonic pulse is carried out, as this ultrasonic pulse is reflected in the measured fluid 12 on the measurement line ML in the reflector distributed uniformly and it is shown in drawing 2 (B) It is set to ultrasonic echo a and returned to the ultrasonic transducer 23. In addition, in drawing 2



(B), Sign b is a multiple reflection echo reflected with the tube wall by the side of ultrasonic pulse incidence, and Sign c is a multiple reflection echo reflected with an opposite side tube wall. dispatch spacing of the ultrasonic pulse sent from the ultrasonic transducer 23 -- 1-/Frpf it is .

[0034] And if filtering processing of the echo signal sent by the ultrasonic transducer 23 is carried out and a velocity distribution is measured along with the measurement line ML using the doppler shift method, it will be displayed like drawing 2 (C). This velocity distribution can be measured with the fluid velocity-distribution measurement means 16 of the UVP unit 13.

[0035] The doppler shift method applies the principle to which only the magnitude to which it was reflected by the reflector of mixture or uniform distribution into the fluid 12, and became an ultrasonic echo, and the frequency of this ultrasonic echo is proportional to the rate of flow when the ultrasonic pulse was emitted into flowing fluid 12 carries out the frequency shift of the inside of piping 11.

[0036] Moreover, the velocity-distribution signal of the measured fluid 12 measured with the ultrasonic fluid velocity-distribution measurement means 16 can be sent to the computer 17 as a flow rate operation means, can integrate with a velocity-distribution signal to radial [ of piping 11 ] here, and can calculate the flow rate of the measured fluid 12 by the time-dependent. If the flow rate in the time amount t of this fluid 12 is set to m (t), it can express with a degree type.

[0037]

[Equation 5]

$$m(t) = \rho \int v(x \cdot t) \cdot dA \quad \dots\dots (1)$$

但し、 $\rho$  : 被測定流体の密度

$v(x \cdot t)$  : 時間 t における速度成分 (x 方向)

(1) Flowing flow rate [ of time amount t ] m (t) can rewrite piping 11 from a formula to a degree type.

[0038]

[Equation 6]

$$m(t) = \rho \int \int v_x(r \cdot \theta \cdot t) \cdot r \cdot dr \cdot d\theta \quad \dots\dots (2)$$

但し、 $v_x(r \cdot \theta \cdot t)$  : 時間 t における配管横断面上の中心から

距離 r, 角度  $\theta$  の管軸方向の速度成分

(2) From a formula, the Doppler type ultrasonic flowmeter 10 can acquire the spatial distribution of the flow of the measured fluid 12 with the speed of response of instant, for example, 50msec (s), -- 100msec extent. the case where time fluctuation exists by the case where sufficient run-up section cannot be taken even if the measured fluid 12 is the flow in piping (tube) 11, closing motion of a valve, a Start pump, a halt, etc. -- the flow of a fluid -- an unstationary state -- three-dimensions distribution -- \*\*\*\*, although it is since this Doppler type ultrasonic flowmeter 10 can search for the velocity distribution of a measurement field by the time-dependent in an instant -- the flow rate of the measured fluid 12 -- a steady state and an unstationary state -- how cannot be asked but it can ask with a sufficient precision correctly.

[0039] Since the Doppler type ultrasonic flowmeter 10 measures the flow rate of a measured fluid by the line measuring method of the velocity distribution using the doppler shift of an ultrasonic pulse echo, in order to raise the accuracy of measurement, it needs to increase the number of the measurement lines ML, as a result the installation number of the ultrasonic transducer 23. The measurement line ML does the include-angle alpha inclination of the ultrasonic transducer 23 of N individual mentioned later in fact to the perpendicular to a tube wall by setting and installing necessary spacing in the hoop direction of piping 11, and it is set so that all the measurement lines ML may pass along the axis of piping 11.

[0040] Then, supposing the flow of the measured fluid 12 which flows the inside of piping 11 can disregard radial, the flow  $v_r$  of an include angle theta, and  $v_{\theta}$  by the flow of the direction of a tube axis, it is set to  $v_x \gg v_r = v_{\theta}$ , and it is simplified and flow rate measurement is expressed with a degree type.

[0041]

[Equation 7]

$$m(t) = \sum_{i=1}^N \cdot \frac{2\pi}{N} \int_{-R}^R \{v_x(r, \theta_i, t) / \sin \alpha\} \cdot r \cdot dr \quad \dots\dots (3)$$

Thus, the flow rate of the called-for measured fluid 12 can be displayed by the time-dependent with a display 18 in an instant. The velocity distribution which meets the measurement line ML in the piping 11 of the measured fluid 12, or the velocity distribution in the piping cross section can also be displayed on this display 18.

(A) About the ultrasonic transmission property, by the way, when this invention person verified the tubing transparency property of an ultrasonic beam (ultrasonic pulse) in installing the ultrasonic transducer 23 in the outer wall of piping 11, he did the knowledge of a resonance transparency phenomenon existing between the fundamental frequency of a supersonic wave, and wall thickness for the first time.

[0042] In the velocity distribution in the piping 11 using an ultrasonic flowmeter 10, as a result measurement of a flow rate, the ultrasonic pulse sent from the ultrasonic transducer 23 penetrates a piping wall, enters in the measured fluid 12, is reflected with the reflector in a fluid, an ultrasonic echo is produced, and this ultrasonic echo penetrates a piping wall again, and is received by the same transducer 23. The SN ratio of an ultrasonic echo signal is greatly influenced by the ultrasonic permeability which penetrates the solid-state wall which is a piping wall in that case.

[0043] It is known that ultrasonic permeability will be involved in the acoustic-impedance ratio of a fluid and a solid-state. When a measured fluid is water and it makes a supersonic wave penetrate from water to a metal solid-state wall, since the acoustic-impedance ratio is large, permeability is low. For this reason, the ultrasonic measurement from the outside of piping which is a metal wall had the difficulty on measurement.

[0044] However, ultrasonic permeability is the fundamental frequency  $f_0$  of wall thickness or a supersonic wave. The knowledge of being related was able to be carried out. It is based on this knowledge and is the fundamental frequency  $f_0$  of wall thickness or a supersonic wave. The wall transparency property of a supersonic wave overall as a parameter was investigated, and it verified experimentally.

[0045] In the experiment, doppler shift reinforcement was analyzed and the transparency property of a supersonic wave was verified.

[0046] When an acoustic impedance is set to  $z$ , it is a solution layer(water)  $z_1$ . Solid-state wall  $z_2$  of wall thickness  $d$  (tube wall) Generally the ultrasonic transmission coefficient  $D$  is expressed with a degree type.

[0047]

[Equation 8]

$$D = 1 / \sqrt{1 + 1/4 (m - 1/m) \cdot \sin(2\pi d/\lambda)} \quad \dots\dots (4)$$

但し、 $m = z_1 / z_2$  で  $\lambda$  は超音波パルスの波長である。

Drawing 3 is drawing showing the ultrasonic permeability of acrylic resin and stainless steel, and water. Sign e shows the ultrasonic transmission curve of stainless steel, and Sign f shows the ultrasonic transmission curve of acrylic resin, respectively. The wall thickness  $[d/\lambda]$  to the wavelength which ultrasonic permeability gives the maximal value and the minimal value from drawing 3 is [Equation 9].

$$\left[ \begin{array}{l} [d/\lambda]_{\max} = 0, \frac{1}{2}, \frac{2}{2}, \frac{3}{2}, \frac{4}{2} \dots\dots = \frac{n}{2} \\ [d/\lambda]_{\min} = \frac{1}{4}, \frac{3}{4}, \frac{5}{4} \dots\dots = \frac{2n+1}{4} \end{array} \right] \quad \dots\dots (5)$$

\*\*\*\*\*

[0048] In this ultrasonic transparency characterization trial, the product made of acrylic resin,

the product made from aluminum, and the tube made from stainless steel with a bore [  $\phi$  ] of 25mm from which the wall thickness of piping differs were used, and water was used as a sample offering fluid. The used supersonic wave is fundamental frequency  $f_0$ . It is the pulse beam which are 2MHz and 4MHz. The ultrasonic transparency property of the stainless steel pipe when using the aluminium pipe when using an ultrasonic pulse (2MHz and 4MHz) and a 2MHz ultrasonic pulse is shown in drawing 4 and drawing 5, respectively. An axis of ordinate shows Doppler reinforcement (arbitration value) for a wall thickness ratio [ as opposed to the wavelength of an ultrasonic pulse in an axis of abscissa ], respectively.

[0049] In an aluminium pipe, there is Doppler reinforcement strong at the time of  $1/2$  wave and  $1/1$  wave from drawing 4, and in a stainless steel pipe, as shown in drawing 5 at the time of  $1/2$  wave, strong Doppler reinforcement exists.

[0050] Fundamental frequency  $f_0$  which has  $1/2$  wave and  $1/1$  wave from the analysis of this drawing 4 and drawing 5 to wall thickness by the aluminium pipe It turns out that the transparency phenomenon strong against a supersonic wave has occurred in resonance, and is  $1/2$  wave of fundamental frequency  $f_0$  to wall thickness at a stainless steel pipe. It turns out that the transparency phenomenon strong against a supersonic wave has arisen in resonance.

[0051] Fundamental frequency  $f_0$  which produces a resonance transparency phenomenon to the wall thickness of piping 11 in measuring the velocity distribution of the measured fluid which flows the inside of piping and measuring a flow rate from this drawing 4 and the ultrasonic transparency property analysis result of drawing 5 A supersonic wave is chosen. Fundamental frequency  $f_0$  of this supersonic wave It is suitably chosen by adjusting the frequency of the electrical signal generated and blamed with an oscillator 20.

(B) When the response characteristic over the excessive flow rate which flows the inside of piping 11 using the Doppler type ultrasonic flowmeter in this operation gestalt about the response characteristic of a Doppler type ultrasonic flowmeter was examined, as shown in drawing 6, the rapid-response property was shown very much.

[0052] It is necessary to make this excessive hydrometry produce a very early flow rate change in piping 11. Since an early flow rate change was produced in piping 11, while aperture used 25mm $\phi$  and small juxtaposition piping of two, and installing the Doppler type ultrasonic flowmeter 10 in one piping and installing the electromagnetic flowmeter in piping of another side, respectively, the solenoid valve was formed in the 1 side of juxtaposition piping, and the response trial at the time of excess was performed by making this solenoid valve open and close.

[0053] In this excessive flow rate response trial, the flow of a measured fluid was fully developed in the measuring point (an ultrasonic flowmeter and electromagnetic-flowmeter installation location), and the electromagnetic flowmeter and the ultrasonic flowmeter 10 performed the flow rate monitor, respectively. The hydrometry of the measured fluid by the ultrasonic flowmeter 10 searched for the velocity distribution on a piping diameter along the direction of a measurement line by one ultrasonic transducer 23, integrated with this velocity distribution, and made it the flow rate.

[0054] If a Doppler type ultrasonic flowmeter is used, since the start and the fall at the time of solenoid-valve ON-OFF are \*\*\*\* and a response characteristic can measure with early and a very sufficient precision, the flow rate to the flow of an unstationary state can also be measured with a sufficient precision. For this reason, the rate of flow on the medial axis in piping was able to be measured, and a big predominance was able to be checked also to the conventional Doppler type ultrasonic flowmeter which assumes a velocity distribution from a theoretical value and calculates a flow rate.

[0055] Next, the 2nd operation gestalt of the Doppler type ultrasonic flowmeter concerning this invention is explained with reference to an accompanying drawing.

[0056] Drawing 7 shows the 2nd operation gestalt of the Doppler type ultrasonic flowmeter concerning this invention. Ultrasonic flowmeter 10A shown in this operation gestalt sets necessary spacing for piping 11 in a hoop direction, and arranges ultrasonic transducer 23i ( $i = 1.2 \dots N$ ) of N individual ( $N \geq 2$ ) for it at a radial. While each ultrasonic transducer 23i is arranged so that the measurement line ML may pass along the tube-axial line of piping 11, it is made to

incline at an include angle alpha to the perpendicular to a piping tube axis in the flow direction of the measured fluid 12.

[0057] It requires Doppler type ultrasonic flowmeter 10A increasing the number of the measurement lines ML from ultrasonic transducer 23i so much, and bringing it close to field measurement, in order to raise the hydrometry precision of a measured fluid, since it is the line measuring method of the velocity distribution using a doppler shift (frequency shift).

[0058] Moreover, in this Doppler type ultrasonic flowmeter 10A, the approach of preparing one set of a multiplexer 30 between the UVP unit 13 and each ultrasonic transducer 23i, and shaking a signal at it is adopted. Reduction of cost can be aimed at, although one set of a multiplexer 30 is prepared, an ultrasonic pulse electrical signal is distributed or the time amount which measurement takes becomes long by carrying out processing which transmits each ultrasonic echo electrical signal to a computer 17 conversely. Even if it forms a multiplexer 30, the rapidity for which the flowmeter by which the current demand is carried out is asked is fully maintainable. Since other configurations do not differ from the Doppler type ultrasonic flowmeter 10 shown in drawing 1, they attach the same sign and omit explanation.

[0059] Flow rate [ of time amount t ] m (t) which flows the inside of piping 11 is expressed to piping 11 like (2) types to a degree type in ultrasonic transducer 23i (i= 1 -- N) at the time of N individual installation beam.

[0060]

[Equation 10]

$$m(t) = \rho \int \int v_x(r, \theta, t) \cdot r \cdot dr \cdot d\theta$$

$$\approx \rho \left( \frac{\pi}{N} \right) \sum_{i=1}^N \left\{ \int v_x(r, \theta_i, t) \cdot r \cdot dr \right. \quad \dots (6)$$

From this (6) type, Doppler type ultrasonic flowmeter 10A The spatial distribution of the flow of the measured fluid 12 can be acquired at a rapid-response rate along with each measurement line ML. Also when time fluctuation exists by the case where run-up section sufficient by flow with unsteady piping 11 cannot be taken, closing motion of a valve, or a Start pump and a halt and curvilinear passage is formed like elbow piping or U typeface piping, the velocity distribution and flow rate of flowing fluid can be correctly measured with a sufficient precision for the inside of piping.

[0061] After setting from the UVP unit 13 to time amount t, specifically sending the velocity distribution on the measurement line ML of each ultrasonic transducer 23i to the computer 17 and integrating this computer 17 with the velocity distribution on the measurement line ML of N book to radial, an integral value is totaled and the flow rate of a measured fluid is calculated. With a display 18, installation of a measured fluid is displayed by time series.

[0062] In the 2nd operation gestalt, although the example which installed eight ultrasonic transducers 23 in the peripheral wall of piping 11 was shown, in this case, the ultrasonic transducer 32 sets spacing to a hoop direction, and should just prepare it in it at least two pieces at the peripheral wall of piping 11. In that case, it is arranged so that the measurement line ML of an ultrasonic pulse sent from each ultrasonic transducer 23 may cross once [ at least ] in a measurement field.

[0063] Although this Doppler type ultrasonic flowmeter 10A is the line measuring method of the velocity distribution using the echo of an ultrasonic pulse sent from the ultrasonic transducer 23 carrying out a doppler shift, by making the measurement line of the ultrasonic pulse from each ultrasonic transducer 23 cross once [ at least ] in a measurement field, it can consider as flat surface (two dimensions) measurement, space information is acquired in an instant, and its accuracy of measurement improves.

[0064] in that case, the measurement line of an ultrasonic pulse by which three pieces are sent [ group ] at a time in nothing and a group from three ultrasonic transducers 23 to make arranges the ultrasonic transducer 23 so that it may cross by one in a measurement field -- the velocity vector of an intersection -- being three-dimensional (three dimensions) -- it can measure. Therefore, the rate of flow of the measured fluid which bends like elbow piping or U character-like piping, and flows in piping by having at least 2 sets of ultrasonic transducers 23 which make

three groups at a time can also be measured with a sufficient precision.

[A] In the approach of searching for time-dependent vector distribution of a measured fluid, and time, if the diameter 11 of macrostomia, for example, 280mm piping, is used comparatively, it will be thought that the velocity distribution of the measured fluid which flows the interior turns into three-dimension distribution, and, in many cases, the flow of the fluid within the diameter piping 11 of macrostomia will serve as unsteady flow of a three dimension.

[0065] In the experiment of laboratory level, prepared, and ultrasonic transducer 23i was installed in the location of 590mm in 20 hoop directions from the rectifier which does not illustrate the piping 11 (inner tube) with an aperture of 280mm made of acrylic resin, and was installed in the radial at equal intervals. The flow of the measured fluid in the test section which is the installation section of this transducer 23i serves as an underdeveloped style. Each ultrasonic transducer 23i set angle-of-inclination  $\alpha$  of a fluid flow direction as 20 degrees to the tube wall perpendicular of piping 11.

[0066] With the piping structure of ultrasonic transducer 23i in this Doppler type ultrasonic flowmeter, as substantially shown in drawing 8 from 20 measurement lines ML, it asks for the two-dimensional velocity vector on 231 intersections. That is, two-dimensional mapping was able to be performed for the flow of the measured fluid 12 in the diameter piping 11 of macrostomia on the piping cross section (the tilt angle  $\alpha$  in the measurement line ML (20 degrees) can be proofread easily [ the direction of the cross section ].), and velocity vector distribution of a time-dependent was able to be searched for. this time -- the flow rate of the measured fluid 12 -- 27 l/sec it is -- when the UVP unit 13 was optimized according to this flow rate, time amount required to search for the velocity distribution of one sheet was 64msec(s).

[0067] In this experiment, the thing of the type which carried out the internal organs of the multi-presser 30 to the UVP unit 13 was used, and it was used in the mode which changes each ultrasonic transducer 23i for every profile measurement of 1024 sheets. Moreover, in this experiment, only acquisition of velocity-distribution data was performed and data processing of the calculus of vectors for two-dimensional mapping was carried out by computer 17 by which off-line connection was made. Drawing 8 shows the velocity vector Fig. in the time average of the measured fluid 12 which flows the inside of the diameter piping 11 of macrostomia (280mmphi) called for by doing in this way. As shown also in this time-dependent vector distribution map, the flow of the upper right part of drawing 8 or a lower left part is disturbed, and it has become unsteady flow.

[B] The Doppler type ultrasonic flowmeter performed the hydrometry trial using the velocity distribution and the hydrometry trial, next industrial use stainless steel piping (bore 250mmphi, 400mmphi) under ordinary temperature ordinary pressure. In this hydrometry trial, it examined by changing various the fundamental frequency  $f_0$  of the ultrasonic pulse transmitted from the ultrasonic transducer 23, paths of the ultrasonic transducer 23, and the wearing approaches in consideration of application in a system plant.

[0068] the test rig for circulation of fluid which this hydrometry trial equipped with the pump for circulation -- constituting -- the inside of this test rig -- the tank for degassing besides two circulating pumps, a flow control valve, and the object for the circulating water impurity removal -- a 5micro microfilter installed, and about 7m stainless-steel piping used for the measurement test piping section of a test rig, the Doppler type ultrasonic flowmeter attached in the center mostly, and equipped the upstream of a trial test section with a honeycomb plate, and that downstream equipped with an orifice type flowmeter and an electromagnetic flowmeter further, respectively.

[0069] The hydrometry trial experimented about a steady flow and unsteady flow using stainless steel piping of 250mmphi and 400mmphi. The dispatch fundamental frequency of an ultrasonic transducer changed whenever [ angle-of-incidence ], and the diameter of a transducer by 1 and 2 or 4MHz, and carried out the survey of the optimal Measuring condition.

[0070] Fundamental frequency  $f_0$  Stainless steel piping (bore 250mmphi) whose stainless steel transparency thickness of 1MHz and the measurement trial section is 2.87mm is prepared, and the velocity-distribution measurement result by one ultrasonic transducer 23 is shown in drawing 9.

[0071] Although drawing 9 has not amended whenever [ from an ultrasonic transducer / angle-of-incidence ] and the effect of [ near / by the side of ultrasonic incidence / the wall ] and the effect of a reflective echo are non-amended data, an ultrasonic echo is well caught through stainless steel piping, and the velocity distribution is clearly measured with a sufficient precision. The ultrasonic echo was able to detect the velocity distribution with a sufficient precision correctly in the remaining part, especially the radial parts of an ultrasonic incidence side and the opposite side except not being vividly displayed near the wall by the side of ultrasonic pulse incidence by a certain cause.

[0072] Moreover, also to fluctuation of the flow of the time of excess, the Doppler type ultrasonic flowmeter could answer at the rate of 50msec - 100msec, and compared the measurement data of the velocity distribution and hydrometry trial under ordinary temperature ordinary pressure with the measured value by the orifice type (differential pressure) flowmeter and the electromagnetic flowmeter. A comparison result is shown in drawing 10 and drawing 11.

[0073] Drawing 11 expands partially the excessive response characteristic when being shown in drawing 10. The basis was also boiled [ curve / g / by the ultrasonic flowmeter 10 at the time of excessive / response characteristic / as shown in drawing 10 and drawing 11 / the response characteristic curve h of an electromagnetic flowmeter ] at the time of flow rate reduction (at the time of a fall) also at the time of the increment in a flow rate (at the time of the start), the rapid-response property was acquired very much, and it was a rapid-response property almost equivalent to the response characteristic curve i by the orifice type flowmeter.

[0074] Therefore, if a Doppler equation ultrasonic flowmeter is used, compared with an electromagnetic flowmeter, a response characteristic can measure with a sufficient precision by non-contact very early, and the flow rate to the flow of the unstationary state which considered the time amount differential term of a NS equation can also be measured with a sufficient precision. For this reason, the rate of flow on the medial axis in piping was able to be measured, and a big predominance was able to be checked also to the conventional Doppler type ultrasonic flowmeter which assumes a velocity distribution from a theoretical value and calculates a flow rate.

[0075] Drawing 12 shows the 3rd operation gestalt of the Doppler type ultrasonic flowmeter concerning this invention.

[0076] Doppler type ultrasonic flowmeter 10B shown in this operation gestalt prepares the UVP unit 13 for every ultrasonic transducer 23i, and can control an ultrasonic transducer now by each UVP unit 13 according to an individual. Since other configurations do not differ from the ultrasonic flowmeter shown in drawing 7, they omit explanation.

[0077] Doppler type ultrasonic flowmeter 10B shown in drawing 12 is the fundamental frequency  $f_0$  from each UVP unit 13, although it becomes the part cost rise since each ultrasonic transducer 23i of every was equipped with the UVP unit 13. Since accommodation control is carried out and it can determine independently according to an individual, it is suitable when the case where the wall thickness of piping 11 is not uniform, the velocity distribution in a high speed, and hydrometry are required.

[0078]

[Effect of the Invention] Since the flow rate which can measure the velocity distribution of a measured fluid along a measurement field using the doppler shift of a supersonic wave in the Doppler type ultrasonic flowmeter applied to this invention as stated above, integrates with this velocity distribution, and flows a measurement field is measurable with quickly sufficient responsibility by the time-dependent, it is correctly accurate also about not only the flow of a steady state but an unstationary state flowing, and can measure by non-contact.

[0079] Moreover, the Doppler type ultrasonic flowmeter concerning this invention can measure the velocity distribution of the measured fluid which flows the inside of piping with a sufficient precision by non-contact along with a measurement line using the TOPPURA shift of a supersonic wave, and can measure the flow rate of the transient changed in time with a sufficient precision by the time-dependent.

[0080] Furthermore, since the ultrasonic pulse to which the Doppler type ultrasonic flowmeter concerning this invention is transmitted from an ultrasonic transmitting means was chosen as

the fundamental frequency which produces a resonance-transparency phenomenon to wall thickness, such as piping, it can make the ultrasonic pulse sent from an ultrasonic transducer able to transmit and receive efficiently by the S/N ratio excellent in the measured fluid, and can raise the accuracy of measurement of a velocity distribution or a flow rate.

[0081] When at least two ultrasonic transducers are prepared and the measurement line by the ultrasonic pulse from one transducer makes it cross once [ at least ] in the measurement line and measurement field from an ultrasonic transducer of another side further again, it can ask for the velocity vector in an intersection with a sufficient precision more correctly, and the measurement precision of a flow rate can be raised. Furthermore, if it arranges so that the measurement line by the ultrasonic pulse to which three ultrasonic transducers are sent at a time in a group from three ultrasonic transducers which constitute nothing and a group may cross by one on a measurement field, it can ask for the velocity vector in a crossover location in three dimensions, and the velocity distribution on curvilinear passage like elbow piping or U character-like piping can also be measured correctly.

[0082] Moreover, the Doppler type ultrasonic flowmeter concerning this invention can measure serially some flow rates of the flow rate system which flows big space by the time-dependent by measuring the velocity distribution which meets the measurement line of a measured fluid using a doppler shift. Furthermore, it is accurate and the flow rate of the opaque or translucent fluid which cannot apply the optical hydrometry approach can also be measured correctly.

---

[Translation done.]

## \* NOTICES \*

JPO and NCIP are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

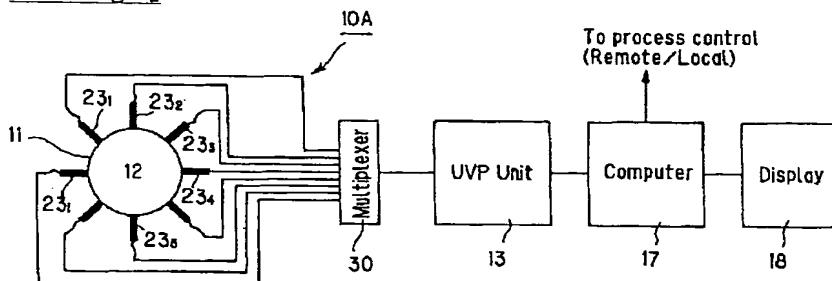
1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.

2.\*\*\*\* shows the word which can not be translated.

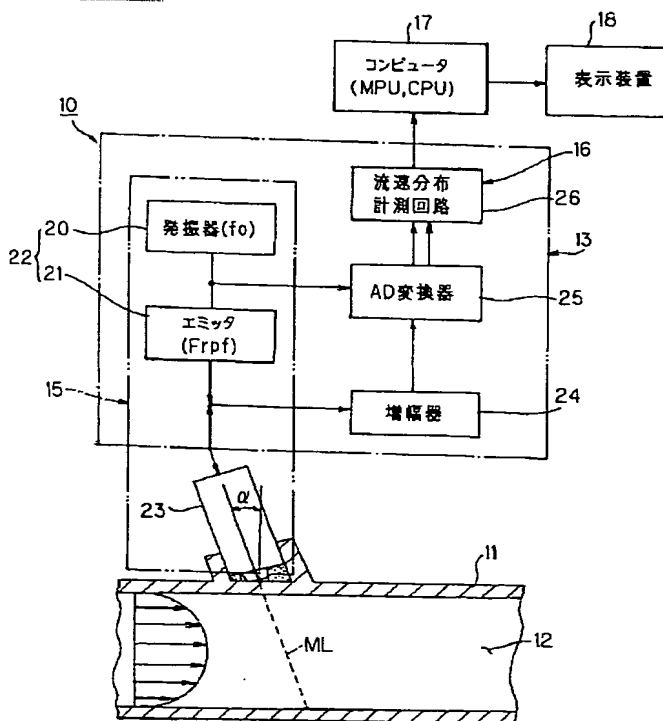
3.In the drawings, any words are not translated.

## DRAWINGS

[Drawing 7]

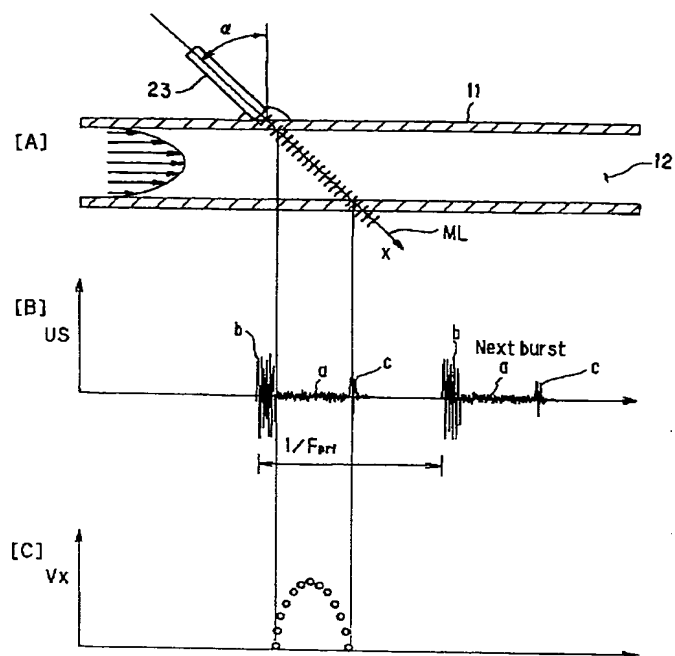


[Drawing 1]



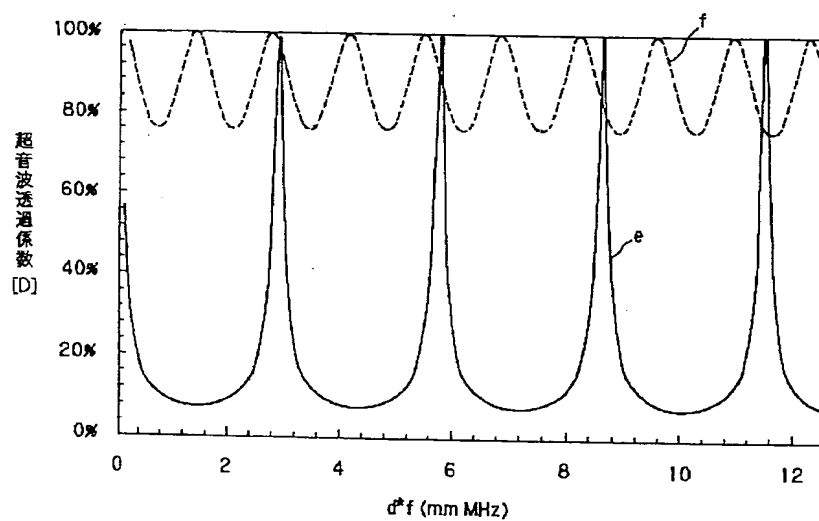
[Drawing 2]



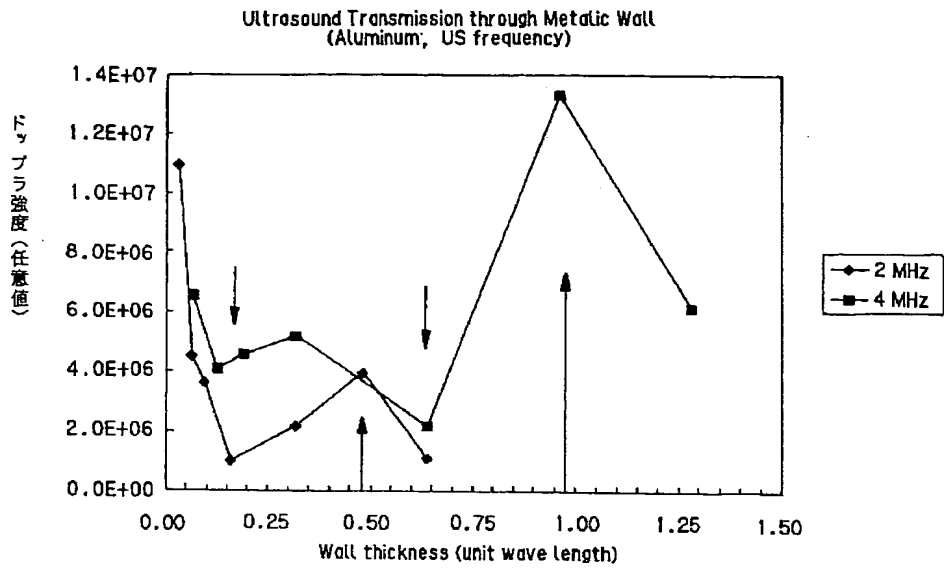


[Drawing 3]

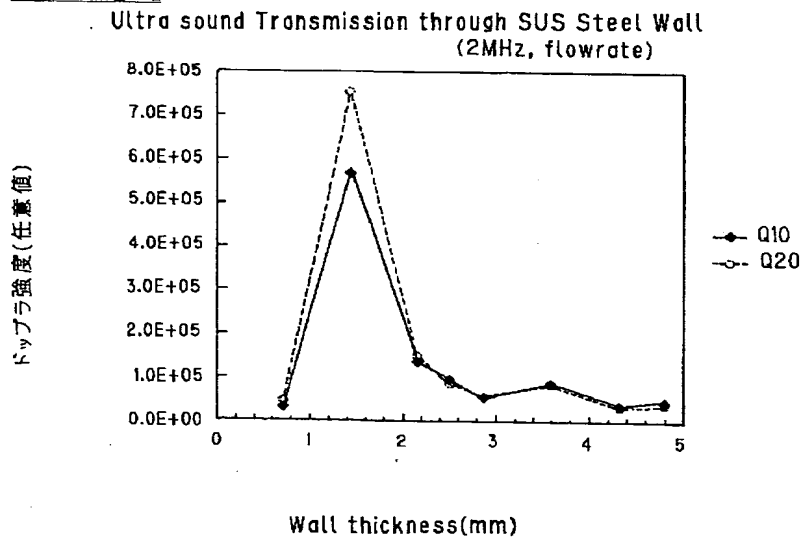
Transmission of ultrasound



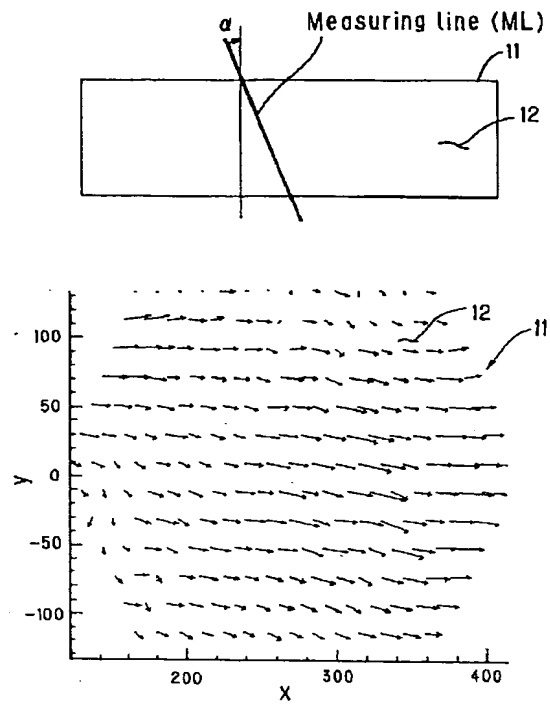
[Drawing 4]



[Drawing 5]

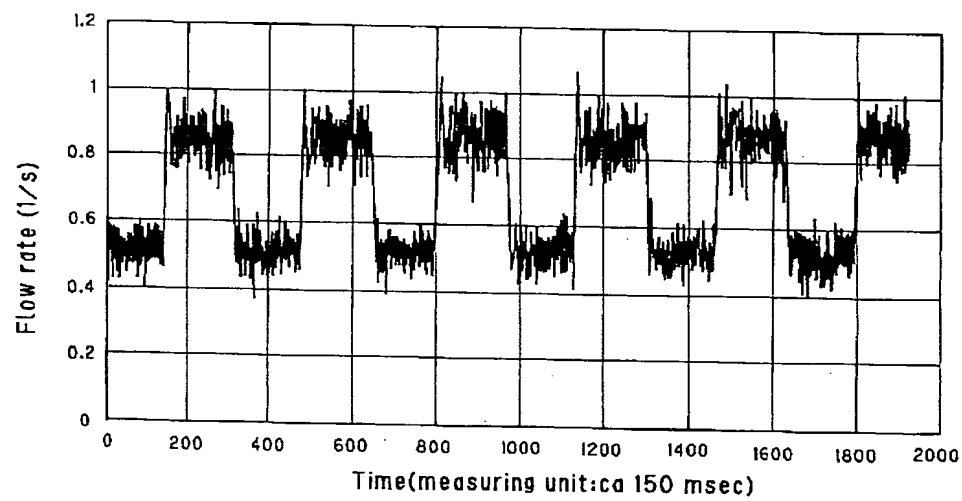


[Drawing 8]



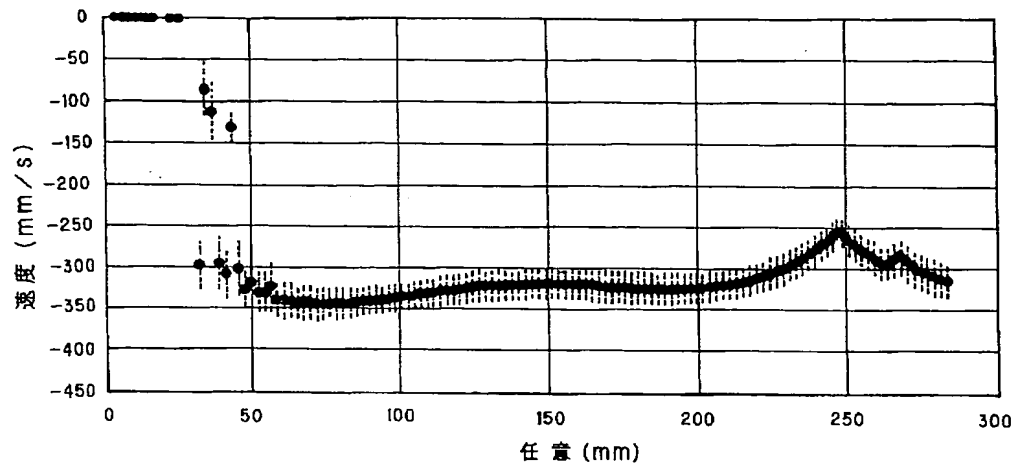
[Drawing 6]

Transient flow rate in a pipe



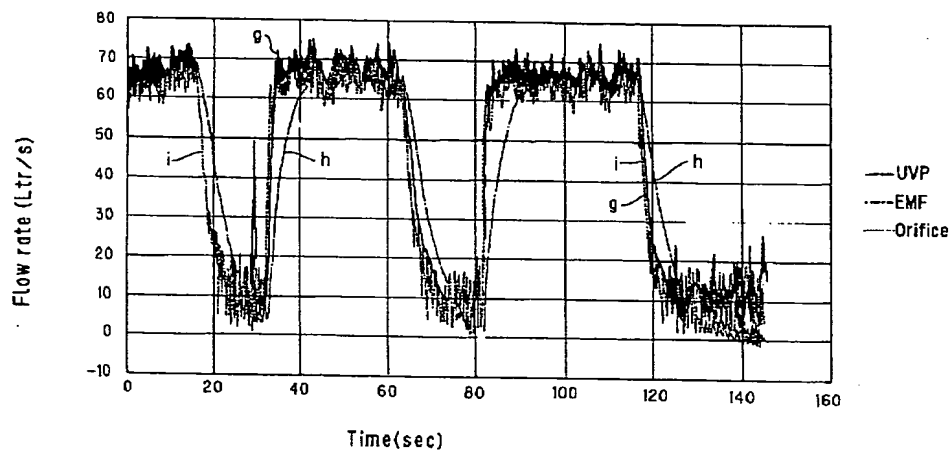
[Drawing 9]

Velocity profile



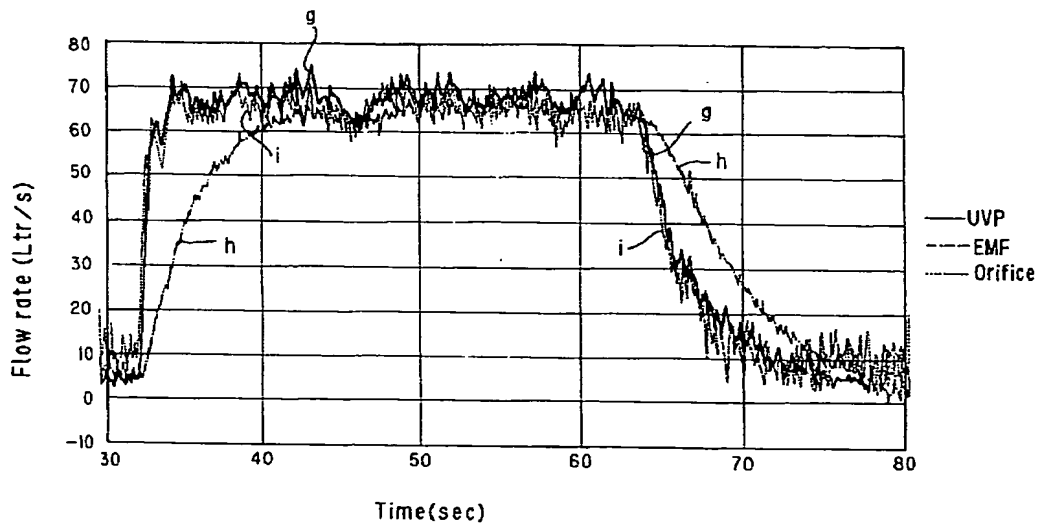
[Drawing 10]

Transient flow rate(comparison)

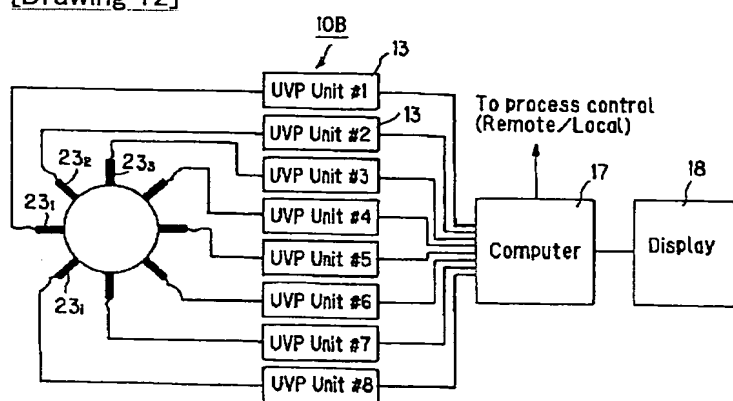


[Drawing 11]

Transient flow rate(comparison)



[Drawing 12]



[Translation done.]

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号  
特開2000-97742  
(P2000-97742A)

(43) 公開日 平成12年4月7日 (2000. 4. 7)

(51) Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テーマコード* (参考)
G 0 1 F 1/66	1 0 3	G 0 1 F 1/66	1 0 3 2 F 0 3 5
G 0 1 P 5/00		G 0 1 P 5/00	C

審査請求 未請求 請求項の数 6 O L (全 13 頁)

(21) 出願番号 特願平10-272359

(22) 出願日 平成10年9月25日 (1998. 9. 25)

(71) 出願人 000003687

東京電力株式会社

東京都千代田区内幸町1丁目1番3号

(72) 発明者 森 治嗣

神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町4番1号

東京電力株式会社原子力研究所内

(72) 発明者 武田 靖

スイス 5200 ブルック レーブモースヴ  
エグ 75イー

(74) 代理人 100078765

弁理士 波多野 久 (外1名)

Fターム(参考) 2F035 DA12

(54) 【発明の名称】 ドップラ式超音波流量計

(57) 【要約】

【課題】超音波のドップラシフトを利用して被測定流体の流速分布から流量を、定常状態のみならず、非定常状態であっても、精度よく時間依存で正確に測定することができるドップラ式超音波流量計を提供する。

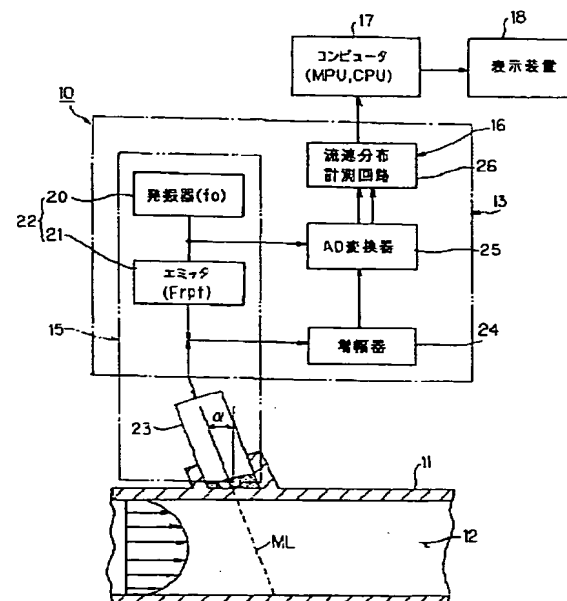
【解決手段】ドップラ式超音波流量計は、所要周波数  $f$  の超音波パルスを超音波トランスジューサ23から測定線MLに沿って被測定流体中に入射させる超音波送信手段15と、被測定流体12に入射された超音波パルスのうち測定領域から反射された超音波エコーを受信し、測定領域における被測定流体12の流速分布を測定する流体速度分布測定手段16と、上記被測定流体12の流速分布に基づいて、流量を  $m(t)$  とするとき、

【数11】

$$m(t) = \int_{-L}^{+L} v(x,t) \cdot dx$$

但し、 $v$  : 流体速度  
 $x$  : 測定領域の位置

の演算を行なう流量演算手段17とを備えたものである。流量演算手段17は測定領域における被測定流体12の流速分布に基づいて流量を計測するようにしたものである。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 所要周波数の超音波パルス超音波トランスジューサから測定線に沿って被測定流体中に入射させる超音波送信手段と、被測定流体に入射された超音波パルスのうち測定領域から反射された超音波エコーを受信し、測定領域における被測定流体の流速分布を測定する流体速度分布測定手段と、上記被測定流体の流速分布に基づいて、流量を $m(t)$ とするととき、

【数1】

$$m(t) = \rho \int v(x \cdot t) \cdot dA$$

但し、 $\rho$ ：被測定流体の密度

$v(x \cdot t)$ ：時間 $t$ における速度成分 \*

$$m(t) = \rho \int \int v_x(r \cdot \theta \cdot t) \cdot r \cdot dr \cdot d\theta$$

$$\approx \rho \sum_{i=1}^N \frac{\pi}{N} \int v_x(r \cdot \theta \cdot t) \cdot r \cdot dr$$

但し、 $v_x(r \cdot \theta \cdot t)$ ：時間 $t$ における配管横断面上の管軸方向の速度成分

の演算を行なうように設定された請求項1記載のドップラ式超音波流量計。

【請求項3】 超音波送信手段から送信される超音波パルスは、配管の壁厚に対し共鳴的透過現象を生じさせる基本周波数が選択されるようにした請求項1記載のドップラ式超音波流量計。

【請求項4】 超音波トランスジューサは配管の周方向に所要の間隔をおいて $N$ 個( $N \geq 2$ )設ける一方、各超音波トランスジューサから放射される超音波パルスの測定線は、配管の放射方向に対し角度 $\alpha$ だけ傾斜させて配置した請求項1または2記載のドップラ式超音波流量計。

【請求項5】 測定領域は二次元平面であり、上記測定領域に沿って超音波パルスを入射させる超音波トランスジューサを少なくとも2つ設け、一方の超音波トランスジューサからの超音波パルスによる測定線が他方の超音波トランスジューサからの測定線と前記測定領域で少なくとも1回交差するように配置した請求項1記載のドップラ式超音波流量計。

【請求項6】 測定領域は二次元平面であり、上記測定領域に沿って超音波パルスを入射させる超音波トランスジューサが3個ずつ組をなして2組以上設けられ、上記組を構成する3個の超音波トランスジューサは前記測定領域上の1点で交差するように配置した請求項1記載のドップラ式超音波流量計。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、超音波のドップラシフトを利用して被測定流体の流量を測定するドップラ式超音波流量計に係り、特に測定領域の流速分布から被測定流体の流量を時間依存で瞬時に測定するドップラ式

\*の演算を行なう流量演算手段とを備え、上記流量演算手段で前記測定領域における被測定流体の流量を計測するようにしたことを特徴とするドップラ式超音波流量計。

【請求項2】 被測定流体は配管を流れる流体であり、 $N$ 個( $N \geq 1$ )の超音波トランスジューサは配管の外周側に周方向に間隔をおいて、かつ送信される超音波パルスの測定線が配管の中心軸線上の所定点を通るように配置される一方、前記流量演算手段は、前記配管内を流れる被測定流体の流量を $m(t)$ とするととき、

10 【数2】

20 超音波流量計に関する。

【0002】

【従来の技術】配管内を流れる被測定流体の流量を測定する流量計には、測定原理により2種類に大別される。

【0003】第1の流量計は、配管内を流れる流体のプロセス量が流れ方向に変化することを利用して流量を測定するものであり、この種の流量計には、オリフィス流量計がある。オリフィス流量計はオリフィス上流側と下流側とで流体の圧力が異なることを利用して流量を計測するものであり、このような流量計測方法を、以下「平均値近似法」という。

【0004】第2の流量計は、主に円管等の配管内の流れの流量測定に用いられるものである。

【0005】この流量計では、配管内の流れの一点、例えば管軸上の所定点での流速を測定し、得られた測定値に基づいて理論値から配管内の流速分布形状を仮定し、この流速分布形状を積分して流量を求めるものである。このような流量測定方法を、以下「近似積分法」という。

【0006】一方、流量計の中には、測定対象である被測定流体に超音波を照射して流体の流量を計測する超音波流量計が知られている。

【0007】この超音波流量計には、平均値近似法により流量を計測するものと、近似積分法により流量を計測するものに大別される。

【0008】平均値近似法を採用した超音波流量計は、超音波パルスが一定の間隔の2点間を通過するのに要する時間が、超音波パルスが流体の流れの上流に向けて進む場合と、その逆に流れの下流に向けて進む場合とで、流体の流れの速度だけ異なることを利用し、所定の2点間の平均速度を求め、流量を計測するものである。

【0009】また、近似積分法を採用した超音波流量計は、配管の中心軸上の一点での被測定流体の速度をドップラシフト法を利用して求め、この流体速度から流量を計測するものであり、特開平6-294670号公報に開示されたものがある。この近似積分法の超音波流量計では、理論値あるいは経験則から流速分布の形を求めて積分を行なうものである。例えば、配管内の層流領域では流速分布は放物線で表われるから、管壁での境界条件を使用することにより、中心軸上で測定された流体速度を用いて流量を求めることができる。この理論解は、厳密には定常状態の流れに対して成立するものであるの

で、近似積分法の超音波流量計は、定常状態の流れにしか適用できず、非定常状態の流れには対応することができない。

【0010】一般に、粘性流体の流れは、ナビヤ・ストウスク（Navier-Stokes：NS）の方程式として良く知られている。従来の超音波流量計は、NS方程式の時間微分項を無視して定常状態に対する流動分布の知識を利用して流量を求めている。このため、流量が時間的に変動し、近似積分法が成立しない流動場（流体の流れの場）が測定対象である場合には、測定精度が著しく低下したり、測定結果の有効性が損われる虞がある。

【0011】このような流動場として、例えば平均流量を出すに必要な時間より流量系の変動時間が短い流動場や、流れが十分に発達していない流動場が挙げられる。前者の場合には、NS方程式の時間微分項がゼロにならず、後者の場合には、NS方程式の一次元近似が成立しない。

【0012】

【発明が解決しようとする課題】従来の流量計では、定常状態における流量計測であり、充分な精度で流量測定を行なうためには、例えば測定箇所の上流側に流れを発生させる助走路を非常に長くする必要があり、配管施設に時間とコスト、労力を要する一方、定常状態の流れの流量計測であるため、非定常状態の流れの流量計測を行なうことが困難であった。

【0013】また、従来の流量計は、円管などの閉じた配管内を流れる流体の平均流量を測定対象とするため、より大きな流量体系の局所的な流量を測定することが不可能であった。例えば、非常に大きな攪拌槽の入口付近あるいは出口付近の時間変動を伴う特徴的な流量計測は、いずれの流量計においても測定不可能であった。

【0014】ところで、三次元空間の流量場における被測定流体の流れは、三次元のベクトル量で表わされるのに対して、従来の流量計は、配管内に一次元の流れを仮定して流量計測を行なうものである。このため、閉じた配管内であっても、流れが三次元的になっている場合には、流量の測定精度が非常に悪くなったり、不可能となる。例えば、エルボ配管やU字状の反転配管のように曲げられた配管の直後では、流体の流れが遠心力作用によ

り三次元的になっており、このような場所に従来の流量計を設置しても流量計測を有効的に行なうことができない。

【0015】本発明は、上述した事情を考慮してなされたもので、超音波のドップラシフトを利用して被測定流体の流量を、定常状態の流れのみならず、非定常状態の流れであっても、時間依存で正確に精度よく測定することができるドップラ式超音波流量計を提供することを目的とする。

10 【0016】本発明の他の目的は、配管内を流れる被測定流体の流速分布を測定し、時間的に変動する過渡時の流量を応答性に優れ、精度よく非接触で計測することができるドップラ式超音波流量計を提供するにある。

【0017】本発明のさらに他の目的は、流体の流れが十分に発達していない箇所や流れが三次元になっている場所でも被測定流体の流量を効率的に精度よく瞬時に測定できるドップラ式超音波流量計を提供するにある。

20 【0018】また、本発明の別の目的は、大きな空間を流れる流量系の一部の流量を部分的に測定することができるドップラ式超音波流量計を提供するにある。

【0019】本発明のさらに別の目的は、光学的流量測定方法が適用できない不透明あるいは半透明の流体であっても流量を精度よく正確に測定することができるドップラ式超音波流量計を提供するにある。

【0020】

【課題を解決するための手段】本発明に係るドップラ式超音波流量計は、上述した課題を解決するために、請求項1に記載したように、所要周波数の超音波パルス超音波トランスジューサから測定線に沿って被測定流体中に入射させる超音波送信手段と、被測定流体に入射された超音波パルスのうち測定領域から反射された超音波エコーを受信し、測定領域における被測定流体の流速分布を測定する流体速度分布測定手段と、上記被測定流体の流速分布に基づいて、流量を $m(t)$ とするととき、

【数3】

$$m(t) = \rho \int v(x \cdot t) \cdot dA$$

但し、 $\rho$ ：被測定流体の密度

$v(x \cdot t)$ ：時間 $t$ における速度成分

40 の演算を行なう流量演算手段とを備え、上記流量演算手段で前記測定領域における被測定流体の流量を計測するものである。

【0021】請求項2に係るドップラ式超音波流量計は、上述した課題を解決するために、被測定流体は配管を流れる流体であり、 $N$ 個（ $N \geq 1$ ）の超音波トランスジューサは配管の外周側に周方向に間隔をおいて、かつ送信される超音波パルスの測定線が配管の中心軸線上の所定点を通るように配置される一方、前記流量演算手段は、前記配管内を流れる被測定流体の流量を $m(t)$ と

50 するとき、



【数4】

$$m(t) = \rho \int \int v_x(r \cdot \theta \cdot t) \cdot r \cdot dr \cdot d\theta$$

$$\approx \rho \sum_i^N \frac{\pi}{N} \int v_x(r \cdot \theta \cdot t) \cdot r \cdot dr$$

但し、 $v_x(r \cdot \theta \cdot t)$  : 時間  $t$  における配管横断面上の管軸方向の速度成分

の演算を行なうように設定されたものである。

【0022】請求項3に係るドップラ式超音波流量計は、上述した課題を解決するために、超音波送信手段から送信される超音波パルスは、配管の壁厚に対し共鳴的透過現象を生じさせる基本周波数が選択されるものである。

【0023】請求項4に係るドップラ式超音波流量計は、上述した課題を解決するために、超音波トランスジューサは配管の周方向に所要の間隔をおいて  $N$  個 ( $N \geq 2$ ) 設ける一方、各超音波トランスジューサから放射される超音波パルスの測定線は、配管の放射方向に対し角度  $\alpha$  だけ傾斜させて配置したものである。

【0024】請求項5に係るドップラ式超音波流量計は、上述した課題を解決するために、測定領域は二次元平面であり、上記測定領域に沿って超音波パルスを入射させる超音波トランスジューサを少なくとも2つ設け、一方の超音波トランスジューサからの超音波パルスによる測定線が他方の超音波トランスジューサからの測定線と前記測定領域で少なくとも1回交差するように配置したものである。

【0025】請求項6に係るドップラ式超音波流量計は、上述した課題を解決するために、測定領域は二次元平面であり、上記測定領域に沿って超音波パルスを入射させる超音波トランスジューサが3個ずつ組をなして2組以上設けられ、上記組を構成する3個の超音波トランスジューサは前記測定領域上の1点で交差するものである。

【0026】

【発明の実施の形態】本発明に係るドップラ式超音波流量計の実施の形態について添付図面を参照して説明する。

【0027】図1は本発明に係るドップラ式超音波流量計の第1実施形態を示す図である。ドップラ式超音波流量計10は配管11内を流れる液体や気体等の被測定流体12の流速分布を測定し、流量を時間依存で瞬時に測定するものである。

【0028】ドップラ式超音波流量計10は、配管11内を流れる被測定流体12の流速を非接触で測定する超音波速度分布計測ユニット（以下、UVPユニットという。）13を備える。UVPユニット13は被測定流体12に測定線MLに沿って所要周波数（基本周波数  $f$ 。）の超音波パルスを送信させる超音波送信手段15と、被測定流体12に入射された超音波パルスの測定領

域から反射された超音波エコーを受信し、測定領域における被測定流体12の流速分布を測定する流体速度分布測定手段16と、被測定流体12の流速分布に基づいて演算処理して半径方向の積分を行ない、被測定流体12の流量を時間依存で求める流量演算手段としてのマイコン、CPU、MPU等のコンピュータ17と、このコンピュータ17からの出力を時系列的に表示可能な表示装置18とを有する。

【0029】超音波送信手段15は、所要周波数、例えば1MHz、2MHz、4MHz等の基本周波数  $f$ 。の電気信号を発生させる発振器（オシレータ）20と、この発振器20からの電気信号を所定の時間間隔（ $1/F_{rep}$ ）毎にパルス状に出力するエミッタ21（周波数  $F_{rep}$ ）とからなる信号発生器22を備え、この信号発生器22から基本周波数  $f$ 。のパルス電気信号が超音波トランスジューサ23に入力される。超音波トランスジューサ23はパルス電気信号の印加により基本周波数  $f$ 。の超音波パルスが測定線MLに沿って発信せしめられる。超音波パルスは例えばパルス幅5mm程度で拡がりをはほとんど持たない直進性のビームである。

【0030】超音波トランスジューサ23は送受信器を兼ねており、超音波トランスジューサ23は発信された超音波パルスが流体中の反射体に当たって反射される超音波エコーを受信するようになっている。反射体は被測定流体12中に一様に含まれる気泡であったり、A1の微粉末等のパーティクルであったり、または被測定流体12とは音響インピーダンスが異なる異物である。

【0031】超音波トランスジューサ23に受信された超音波エコーは、このトランスジューサ23でエコー電気信号に変換される。このエコー電気信号は増幅器24で増幅された後、AD変換器25を通してデジタル化され、このデジタルエコー信号が流速分布計測回路26に入力される。流速分布計測回路26には、発振器20からの基本周波数  $f$ 。の電気信号がデジタル化されて入力され、両信号の周波数差からドップラシフトに基づく流速の変化を計測し、測定線MLに沿う測定領域の流速分布を算出している。測定領域の流速分布を傾斜角  $\alpha$  で校正することで配管11の横断面における流速分布を計測することができる。

【0032】次に、図2を参照してドップラ式超音波流量計10の作動原理を説明する。

【0033】図2（A）に示すように、超音波トランスジューサ23を配管11の放射方向に対し角度  $\alpha$  だけ被

10

20

30

40

50

測定体の流れ方向に傾けて設置した状態で、超音波トランスジューサ23から所要周波数 $f$ の超音波パルスを入射させると、この超音波パルスは測定線ML上の被測定流体12に一樣に分布する反射体によって反射し、図2(B)に示すように、超音波エコーaとなって超音波トランスジューサ23に戻される。なお、図2(B)において符号bは超音波パルス入射側の管壁で反射する多重反射エコーであり、符号cは、反対側管壁で反射する多重反射エコーである。超音波トランスジューサ23から発信される超音波パルスの発信間隔は $1/F_{ref}$ である。

【0034】そして、超音波トランスジューサ23で発信したエコー信号をフィルタリング処理し、ドップラシフト法を利用して測定線MLに沿って流速分布を計測すると、図2(C)のように表示される。この流速分布は

$$m(t) = \rho \int v(x, t) \cdot dA$$

但し、 $\rho$ ：被測定流体の密度

$v(x, t)$ ：時間 $t$ における速度成分(x方向)

(1)式から配管11を流れる時間 $t$ の流量 $m(t)$  ※【0038】  
は、次式に書き換えることができる。 ※【数6】

$$m(t) = \rho \int \int v_x(r, \theta, t) \cdot r \cdot dr \cdot d\theta \quad \dots (2)$$

但し、 $v_x(r, \theta, t)$ ：時間 $t$ における配管横断面上の中心から

距離 $r$ 、角度 $\theta$ の管軸方向の速度成分

(2)式より、ドップラ式超音波流量計10は、被測定流体12の流れの空間分布を瞬時、例えば50msec～100msec程度の応答速度で得ることができる。被測定流体12は配管(円管)11内の流れであっても、充分な助走区間をとれない場合や、弁の開閉やポンプの起動・停止などで時間的な揺らぎが存在する場合には、流体の流れは非定常状態で三次元分布をもっているが、このドップラ式超音波流量計10は、測定領域の流速分布を時間依存で瞬時に求めることができるので、被測定流体12の流量を定常状態、非定常状態如何を問わず、正確に精度よく求めることができる。

【0039】ドップラ式超音波流量計10は、超音波パルスエコーのドップラシフトを利用した流速分布の線測定法で被測定流体の流量を測定するものであるから、測★40

$$m(t) = \sum_{i=1}^N \cdot \frac{2\pi}{N} \int_{-R}^R \{v_x(r, \theta_i, t) / \sin\alpha\} \cdot r \cdot dr \quad \dots (3)$$

このように、求められた被測定流体12の流量は、表示装置18により時間依存で瞬時に表示することができる。この表示装置18には、被測定流体12の配管11内の測定線MLに沿う流速分布あるいは配管横断面上における流速分布を表示することもできる。

#### (A) 超音波透過率特性について

ところで、本発明者は、超音波トランスジューサ23を

※することができる。

【0035】ドップラシフト法は、配管11内を流れる流体12中に超音波パルスを放射すると、流体12中に混在あるいは一樣分布の反射体によって反射され、超音波エコーとなり、この超音波エコーの周波数が流速に比例した大きさだけ周波数シフトする原理を応用したものである。

【0036】また、超音波流体速度分布測定手段16で測定された被測定流体12の流速分布信号は流量演算手段としてのコンピュータ17に送られ、ここで流速分布信号を配管11の半径方向に積分し、被測定流体12の流量を時間依存で求めることができる。この流体12の時間 $t$ における流量を $m(t)$ とすると、次式で表わすことができる。

【0037】

【数5】

..... (1)

★定精度を向上させるためには、測定線MLの数、ひいては超音波トランスジューサ23の設置台数を増やす必要がある。実際には後述するN個の超音波トランスジューサ23を配管11の周方向に所要の間隔をおいて設置し、測定線MLは管壁への垂線に対し角度 $\alpha$ 傾斜させ、全ての測定線MLが配管11の軸線を通るようにセットされる。

【0040】そこで、配管11内を流れる被測定流体12の流れが、管軸方向の流れで半径方向や角度 $\theta$ の流れ $v_r$ 、 $v_\theta$ を無視できるとすると、 $v_x \gg v_r = v_\theta$ となり、流量計測は簡素化され、次式で表わされる。

【0041】

【数7】

配管11の外壁に設置するに当り、超音波ビーム(超音波パルス)の管透過特性を検証したところ、超音波の基本周波数と壁厚との間に共鳴的な透過現象が存在することを初めて知見した。

【0042】超音波流量計10を用いた配管11内の流速分布、ひいては流量の測定では、超音波トランスジューサ23から発信された超音波パルスは配管壁を透過し

て被測定流体12内に入り、流体中の反射体と反射して超音波エコーを生じ、この超音波エコーは再び配管壁を透過して同じトランスジューサ23で受信される。その際、超音波エコー信号のSN比は配管壁である固体壁を透過する超音波透過率に大きく影響される。

【0043】超音波透過率は、流体と固体の音響インピーダンス比に係わることが知られている。被測定流体が水である場合、水から金属製固体壁へ超音波を透過させる場合、音響インピーダンス比が大きいため、透過率が低い。このため、金属壁である配管外からの超音波測定は、測定上の困難さがあった。

【0044】しかしながら、超音波透過率は、壁厚や超\*

$$D = 1 / \sqrt{1 + 1/4 (m - 1/m) \cdot \sin(2\pi d/\lambda)} \quad \dots\dots (4)$$

但し、 $m = z_1 / z_2$  で $\lambda$ は超音波パルスの波長である。

図3はアクリル樹脂およびステンレス鋼と水との超音波透過率を示す図である。符号eはステンレス鋼の超音波透過曲線を、符号fはアクリル樹脂の超音波透過曲線を\*

$$\left. \begin{aligned} [d/\lambda]_{\max} &= 0, \frac{1}{2}, \frac{2}{2}, \frac{3}{2}, \frac{4}{2}, \dots\dots = \frac{n}{2} \\ [d/\lambda]_{\min} &= \frac{1}{4}, \frac{3}{4}, \frac{5}{4}, \dots\dots = \frac{2n+1}{4} \end{aligned} \right\} \dots\dots (5)$$

が得られる。

【0048】この超音波透過特性評価試験では、配管の壁厚が異なる内径25mmφのアクリル樹脂製、アルミニウム製、およびステンレス鋼製円管を使用し、供試流体として水を用いた。使用した超音波は、基本周波数f。が2MHz、4MHzのパルスビームである。2MHzと4MHzの超音波パルスを用いたときのアルミニウム管、2MHzの超音波パルスを用いたときのステンレス鋼管の超音波透過特性を図4および図5にそれぞれ示す。横軸は超音波パルスの波長に対する壁厚比を、縦軸はドップラ強度（任意値）をそれぞれ示す。

【0049】図4からアルミニウム管では、1/2波長および1/1波長のときに強いドップラ強度があり、ステンレス鋼管では、1/2波長のときに図5に示すように強いドップラ強度が存在する。

【0050】この図4および図5の解析から、アルミニウム管では管厚に対し1/2波長および1/1波長を有する基本周波数f。の超音波に強い透過現象が共鳴的に起きていることがわかり、ステンレス鋼管では、管厚に対し1/2波長の基本周波数f。の超音波に強い透過現象が共鳴的に生じていることがわかる。

【0051】この図4および図5の超音波透過特性解析結果から、配管内を流れる被測定流体の流速分布を測定し、流量を計測する場合には、配管11の壁厚に対し共鳴的な透過現象を生じさせる基本周波数f。の超音波が選択される。この超音波の基本周波数f。は発振器20で発生せしめられる電気信号の周波数を調整することにより適宜選択される。

(B) ドップラ式超音波流量計の応答特性について

\* 音波の基本周波数f。にも関係していることを知見することができた。この知見に基づき、壁厚や超音波の基本周波数f。もパラメータとして全体的な超音波の壁透過特性を調査し、実験的に検証した。

【0045】実験では、ドップラシフト強度を解析して超音波の透過特性を検証した。

【0046】音響インピーダンスを $z$ とすると、液層（水） $z_1$ と壁厚dの固体壁（管壁） $z_2$ の超音波透過係数Dは、一般に次式で表わされる。

【0047】

【数8】

※それぞれ示す。図3から超音波透過率が極大値および極小値を与える波長に対する壁厚 $[d/\lambda]$ は、

【数9】

本実施形態におけるドップラ式超音波流量計を用いて、配管11内を流れる過度流量に対する応答特性を試験したところ、図6に示すように、非常に早い応答特性を示した。

【0052】この過度流量測定には、非常に早い流量変化を配管11内に生じさせる必要がある。配管11内に早い流量変化を生じさせるために口径が25mmφと小さい2本の並列配管を使用し、一方の配管にドップラ式超音波流量計10を、他方の配管に電磁流量計をそれぞれ設置する一方、並列配管の一侧に電磁弁を設け、この電磁弁を開閉させることで過度時の応答試験を行なった。

【0053】この過度流量応答試験では、測定位置（超音波流量計や電磁流量計設置位置）で被測定流体の流れは充分に発達しており、電磁流量計と超音波流量計10でそれぞれ流量モニタを行なった。超音波流量計10による被測定流体の流量測定は1本の超音波トランスジューサ23で配管直径上の流速分布を測定線方向に沿って求め、この流速分布を積分して流量とした。

【0054】ドップラ式超音波流量計を用いると、電磁弁ON-OFF時の立上がりや立下がりが急俊であり、応答特性が非常に早く、精度よく測定できるので、非定常状態の流れに対する流量も精度よく測定できる。このため、配管内の中心軸上の流速を測定し、理論値から流速分布を仮定して流量を求める従来のドップラ式超音波流量計に対しても、大きな優位性を確認することができた。

【0055】次に、本発明に係るドップラ式超音波流量計の第2実施形態について添付図面を参照して説明す

る。

【0056】図7は、本発明に係るドップラ式超音波流量計の第2実施形態を示すものである。この実施形態に示された超音波流量計10Aは配管11にN個（ $N \geq 2$ ）の超音波トランスジューサ23i（ $i = 1, 2, \dots, N$ ）を周方向に所要の間隔をおいて放射状に配置したものである。各超音波トランスジューサ23iは測定線MLが配管11の管軸線を通るように配置される一方、被測定流体12の流れ方向に配管管軸への垂線に対し角度 $\alpha$ で傾斜させたものである。

【0057】ドップラ式超音波流量計10Aはドップラシフト（周波数シフト）を利用した流速分布の線測定法であるから、被測定流体の流量測定精度を上げるためには、それだけ超音波トランスジューサ23iからの測定線MLの数を増大させ、面測定に近付けることを要する。

【0058】また、このドップラ式超音波流量計10AではUVPユニット13と各超音波トランスジューサ2\*

$$m(t) = \rho \int \int v_x(r, \theta, t) \cdot r \cdot dr \cdot d\theta$$

$$\approx \rho \left( \frac{\pi}{N} \right) \sum_{i=1}^N \left\{ \int v_x(r, \theta_i, t) \cdot r \cdot dr \right. \quad \dots (6)$$

この(6)式より、ドップラ式超音波流量計10Aは、被測定流体12の流れの空間分布を、各測定線MLに沿って早い応答速度で得ることができ、配管11が非定常の流れで充分な助走区間をとれない場合や、弁の開閉やポンプの起動・停止で時間的な揺ぎが存在する場合、エルボ配管やU字形配管のように曲線流路が形成される場合にも、配管内を流れる流体の流速分布や流量を正確に精度よく測定できる。

【0061】具体的には、UVPユニット13から時間tにおいて、各超音波トランスジューサ23iの測定線ML上における速度分布がコンピュータ17に送られ、このコンピュータ17では、N本の測定線ML上の速度分布を半径方向に積分した上で、積分値を総和して被測定流体の流量を求めるようになっている。表示装置18では被測定流体の設置を時系列で表示するようになっている。

【0062】第2実施形態においては、配管11の外周壁に8個の超音波トランスジューサ23を設置した例を示したが、この場合、超音波トランスジューサ32は配管11の外周壁に周方向に間隔をおいて少なくとも2個設ければよい。その際、各超音波トランスジューサ23から発信される超音波パルスの測定線MLが測定領域内で少なくとも1回交差するように配置される。

【0063】このドップラ式超音波流量計10Aは、超音波トランスジューサ23から発信される超音波パルスのエコーがドップラシフトをすることを利用した流速分布の線測定方法であるが、各超音波トランスジューサ23からの超音波パルスの測定線を測定領域内で少なくとも1回交差させることにより、平面（二次元）測定とすることができ、空間情報が瞬時に得られ、測定精度が向

\* 3iとの間に1台のマルチプレクサ30を設けて信号を振る方法を採用している。1台のマルチプレクサ30を設けて超音波パルス電気信号を振り分けたり、逆に各超音波エコー電気信号をコンピュータ17に送信する処理をすることで、測定に要する時間が長くなるが、コストの低減を図ることができる。マルチプレクサ30を設けても、現在要求されている流量計に求められる高速度性は十分に維持できる。他の構成は、図1に示されたドップラ式超音波流量計10と異ならないので同一符号を付して説明を省略する。

【0059】配管11に超音波トランスジューサ23i（ $i = 1 \dots N$ ）をN個据付けたとき、配管11内を流れる時間tの流量m(t)は、(2)式から次式のように表わされる。

【0060】

【数10】

上する。

【0064】その際、超音波トランスジューサ23は3個ずつが組をなし、組をなす3個の超音波トランスジューサ23から発信される超音波パルスの測定線が測定領域内の1点で交差するように配置することにより、交点の速度ベクトルを立体的（三次元）に測定できる。したがって、3個ずつ組をなす超音波トランスジューサ23を少なくとも2組備えることで、エルボ配管やU字状配管のように曲り配管内に流れる被測定流体の流速も精度よく測定することができる。

【A】被測定流体の時間依存ベクトル分布を求める方法  
ところで、比較的大口径、例えば280mmの配管11を用いると、内部を流れる被測定流体の流速分布は3次元分布になると考えられ、大口径配管11内での流体の流れは、多くの場合3次元の非定常流となる。

【0065】実験室レベルの実験では、口径280mmの亚克力樹脂製の配管11（内管）を用意し、図示しない整流器から590mmの位置に超音波トランスジューサ23iを20本周方向に等間隔に放射状に設置した。このトランスジューサ23iの設置部である測定部における被測定流体の流れは未発達流となる。各超音波トランスジューサ23iは配管11の管壁垂線に対し、流体流れ方向の傾き角 $\alpha$ を $20^\circ$ に設定した。

【0066】このドップラ式超音波流量計における超音波トランスジューサ23iの配管構造では20本の測定線MLから実質的に231個の交点上の2次元速度ベクトルを図8に示すように求める。すなわち、大口径配管11内における被測定流体12の流れを配管横断面（測定線MLにおける傾斜角 $\alpha$ （ $20^\circ$ ）は、横断面方向に簡単に較正することができる。）で2次元マッピングを

行ない、時間依存の速度ベクトル分布を求めることができた。このとき、被測定流体12の流量は271/secであり、この流量に応じてUVPユニット13の最適化を行なったところ、一枚の流速分布を求めるのに必要な時間は64 msecであった。

【0067】この実験では、UVPユニット13にマルチプレッサ30を内蔵したタイプのものを使用し、各超音波トランスジューサ23iを1024枚のプロフィール測定毎に切り替えるモードで使用した。また、この実験では、流速分布データの取得のみを行ない、2次元マッピングのためのベクトル計算はオフライン接続されたコンピュータ17で演算処理した。図8はこのようにして求められた大口径配管(280mmφ)11内を流れる被測定流体12の時間平均における速度ベクトル図を示す。この時間依存ベクトル分布図からも分かるように、図8の右上部分や左下部分の流れが乱され、非定常の流れとなっている。

#### 【B】常温常圧下における流速分布・流量測定試験

次に、工業用ステンレス鋼配管(内径250mmφ、400mmφ)を用いて、ドップラ式超音波流量計により流量測定試験を行なった。この流量測定試験では、実機プラントへの適用を考慮し、超音波トランスジューサ23から送信される超音波パルスの基本周波数f、超音波トランスジューサ23の径、装着方法を種々変えて試験を実施した。

【0068】この流量測定試験は、循環用ポンプを備えた流体循環用試験ループを構成し、この試験ループ内に循環ポンプ2台の他、脱泡用タンク、流量調節弁、循環水不純物除去用5μのマイクロフィルタを設置し、さらに、試験ループの測定試験配管部には約7mのステンレス鋼配管を使用し、ほぼ中央にドップラ式超音波流量計を取付け、試験測定部の上流側に整流格子板を、その下流側にオリフィス式流量計および電磁流量計をそれぞれ装着した。

【0069】流量測定試験は、250mmφおよび400mmφのステンレス配管を使用して定常流、非定常流について実験を実施した。超音波トランスジューサの発信基本周波数は1、2、4MHzで入射角度とトランスジューサ径を変えて最適測定条件をサーベイした。

【0070】基本周波数fが1MHz、測定試験部のステンレス鋼透過厚さが2.87mmのステンレス鋼配管(内径250mmφ)を用意し、1つの超音波トランスジューサ23による流速分布測定結果を図9に示す。

【0071】図9は超音波トランスジューサからの入射角度が未補正であり、超音波入射側の壁近傍の影響や反射エコーの影響が未補正のデータであるが、ステンレス鋼配管を通して超音波エコーが良く捉えられ、流速分布が精度よく明瞭に測定されている。超音波エコーは超音波パルス入射側の壁近傍が何らかの原因で鮮明に表示されない以外、残りの部分、特に超音波入射側と反対側の

半径方向部分で流速分布を正確に精度よく検出することができた。

【0072】また、ドップラ式超音波流量計は、過度時の流れの揺ぎに対しても、50msec~100msecの速度で応答可能であり、常温常圧下での流速分布・流量測定試験の測定データをオリフィス式(差圧)流量計および電磁流量計による測定値と比較した。比較結果は図10および図11に示す。

【0073】図11は図10に示された過度時の応答特性を部分的に拡大したものである。過度時の超音波流量計10による応答特性曲線gを図10および図11に示すように、電磁流量計の応答特性曲線hに比べ、流量増加時(立上がり時)も流量減少時(立下がり時)もともに非常に早い応答特性が得られ、オリフィス式流量計による応答特性曲線iとはほぼ同等の早い応答特性であった。

【0074】したがって、ドップラ式超音波流量計を用いると、電磁流量計に較べ応答特性が非常に早く、非接触で精度よく測定でき、NS方程式の時間微分項を配慮した非定常状態の流れに対する流量も精度よく測定できる。このため、配管内の中心軸上の流速を測定し、理論値から流速分布を仮定して流量を求める従来のドップラ式超音波流量計に対しても、大きな優位性を確認することができた。

【0075】図12は本発明に係るドップラ式超音波流量計の第3実施形態を示すものである。

【0076】この実施形態に示されたドップラ式超音波流量計10Bは、超音波トランスジューサ23i毎にUVPユニット13を用意し、各UVPユニット13で超音波トランスジューサを個別に制御できるようになっている。他の構成は、図7に示される超音波流量計と異ならないので説明を省略する。

【0077】図12に示されたドップラ式超音波流量計10Bは各超音波トランスジューサ23i毎にUVPユニット13を備えたので、その分コストアップになるが、各UVPユニット13からの基本周波数fを個別に調節制御し、独立して決定できるので、配管11の壁厚が一様でない場合や、高速での流速分布や流量測定が要求される場合に適する。

【0078】

【発明の効果】以上に述べたように本発明に係るドップラ式超音波流量計においては、超音波のドップラシフトを利用して被測定流体の流速分布を測定領域に沿って測定することができ、この流速分布を積分して測定領域を流れる流量を時間依存で迅速に応答性良く計測することができるので、定常状態の流れだけでなく、非定常状態の流れについても正確に精度よく、非接触で測定することができる。

【0079】また、本発明に係るドップラ式超音波流量計は、配管内を流れる被測定流体の流速分布を超音波の

トッブラシフトを利用して測定線に沿って精度よく非接触で測定でき、時間的に変動する過渡時の流量を精度よく時間依存で測定できる。

【0080】さらに、本発明に係るドップラ式超音波流量計は、超音波送信手段から送信される超音波パルスは、配管等の壁厚に対し共鳴の透過現象を生じさせる基本周波数に選択されたので、超音波トランスジューサから発信される超音波パルスを被測定流体に優れたS/N比で効率よく送受信させることができ、流速分布や流量の測定精度を向上させることができる。

【0081】さらにまた、超音波トランスジューサを少なくとも2つ設け、一方のトランスジューサからの超音波パルスによる測定線が他方の超音波トランスジューサからの測定線と測定領域で少なくとも1回交差させることにより、交点における速度ベクトルをより正確に精度よく求めることができ、流量の計測精度を向上させることができる。さらに、超音波トランスジューサが3個ずつ組をなし、組を構成する3個の超音波トランスジューサから発信される超音波パルスによる測定線が測定領域上の1点で交差するように配置すると、交差位置での速度ベクトルを立体的に求めることができ、エルボ配管やU字状配管のような曲線流路上の速度分布も正確に測定できる。

【0082】また、本発明に係るドップラ式超音波流量計は、ドップラシフトを利用して被測定流体の測定線に沿う流速分布を測定することにより、大きな空間を流れる流量系の一部の流量を時間依存で時系列的に計測することができる。さらに、光学的流量測定方法が適用できない不透明あるいは半透明の流体の流量をも精度よく、正確に測定することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明に係るドップラ式超音波流量計の一実施形態を示す簡略的な構成図。

【図2】本発明に係るドップラ式超音波流量計による流量測定における作動原理を説明する図。

【図3】ステンレス鋼およびアクリル樹脂の超音波透過特性を説明する図。

\*【図4】アルミニウムの超音波透過特性を、壁厚に対するドップラ強度の測定により表示した図。

【図5】ステンレス鋼の超音波透過特性を、壁厚に対するドップラ強度の測定により表示した図。

【図6】配管内を流れる過渡時の流量割合がドップラ式超音波流量計の応答特性を説明した図。

【図7】本発明に係るドップラ式超音波流量計の第2実施形態を示す簡略的な構成図。

10 【図8】配管内を流れる被測定流体の横断面（あるいは測定領域）における速度ベクトルを示す図。

【図9】本発明に係るドップラ式超音波流量計で実測された被測定流体の直径方向の流速分布の測定データを示す図。

【図10】本発明に係るドップラ式超音波流量計の応答特性を電磁流量計およびオリフィス式流量計と比較して示す図。

【図11】図10の一部を部分的に時間拡大して示す図。

20 【図12】本発明に係るドップラ式超音波流量計の第3実施形態を簡略的に示す図。

【符号の説明】

10 ドップラ式超音波流量計

11 配管

12 被測定流体

13 超音波速度分布計測ユニット（UVPユニット）

15 超音波送信手段

16 流体速度分布測定手段

17 コンピュータ（流量演算手段）

18 表示装置

30 20 発振器

21 エミッタ

22 信号発生器

23 超音波トランスジューサ

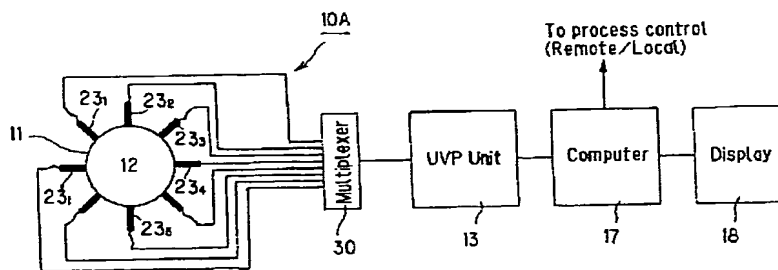
24 増幅器

25 A/D変換器

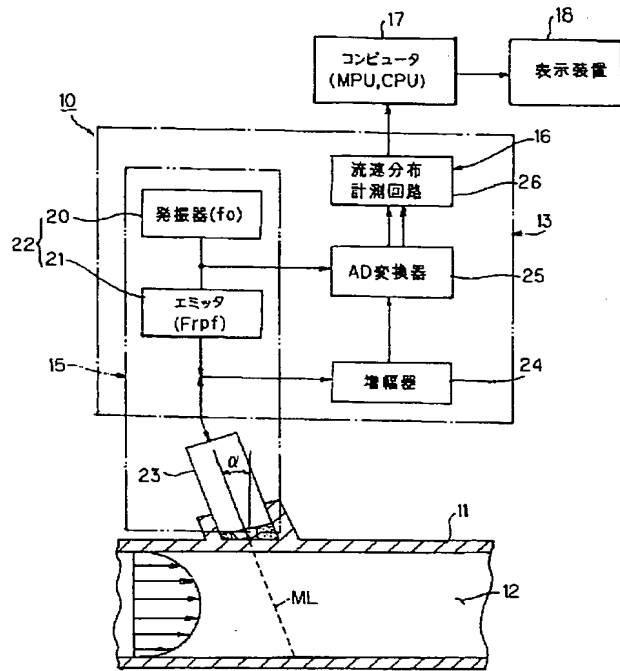
26 流速分布計測回路

\* 30 マルチプレクサ

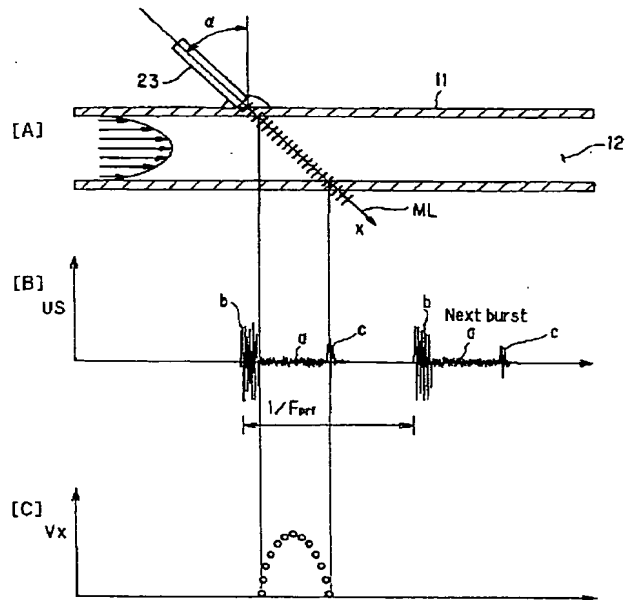
【図7】



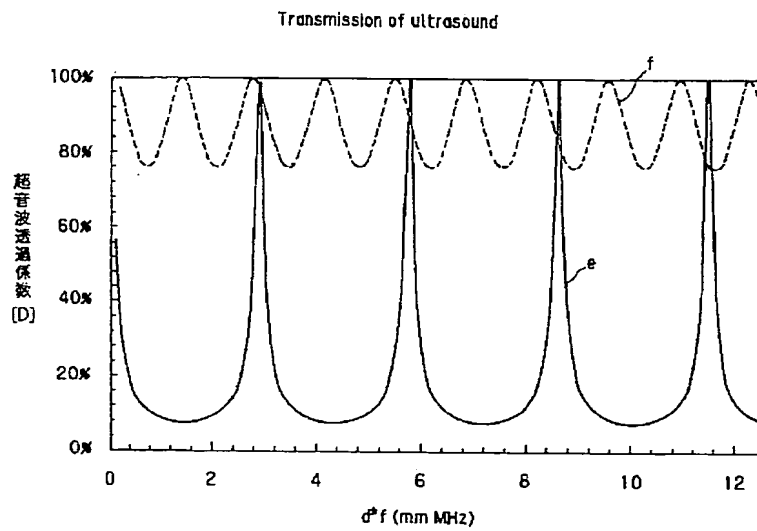
【図1】



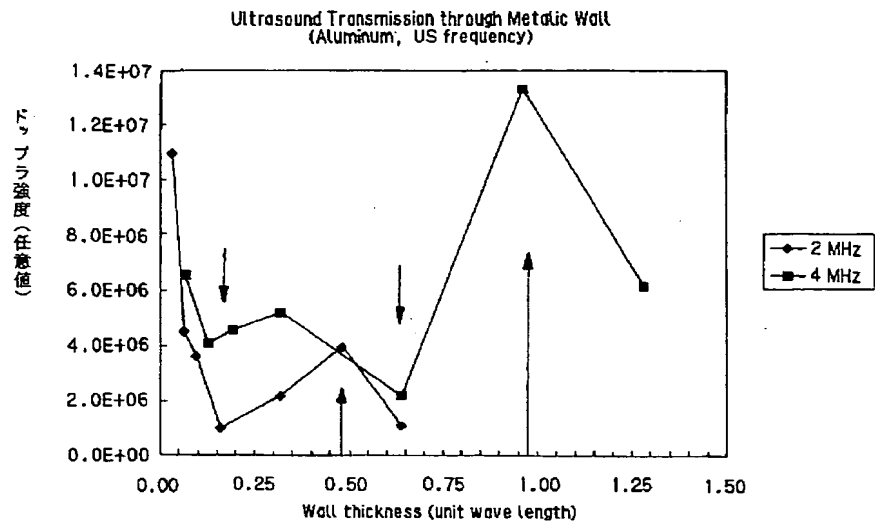
【図2】



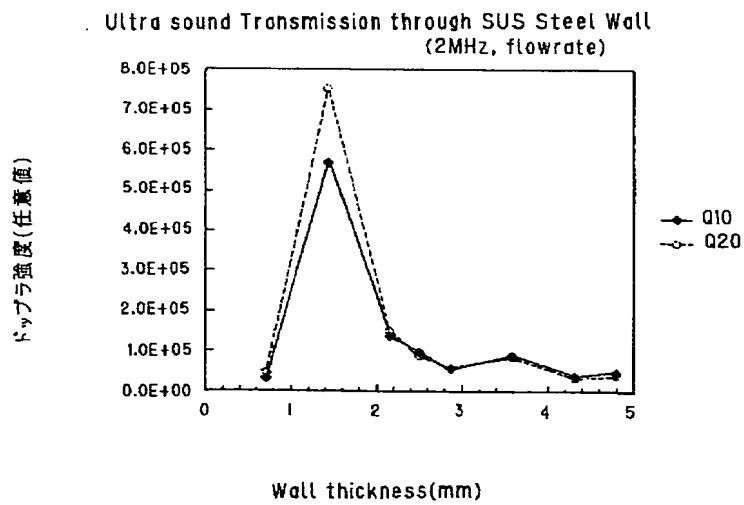
【図3】



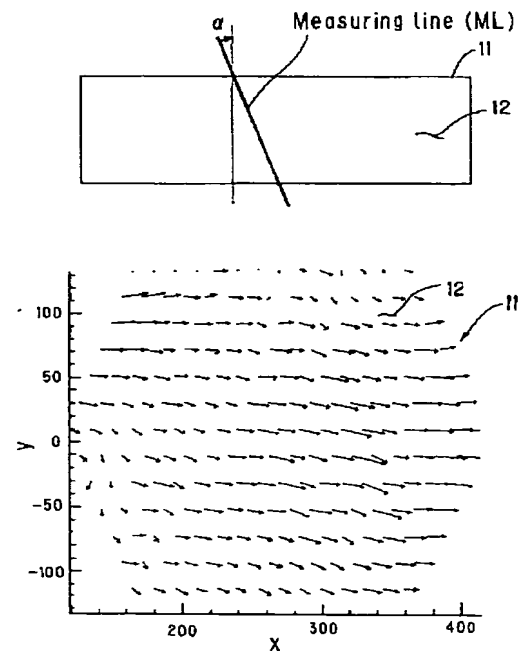
【図4】



【図5】



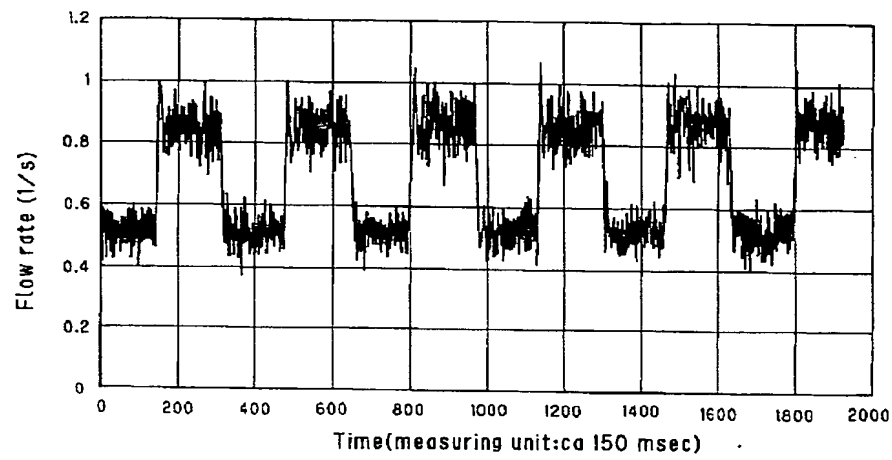
【図8】





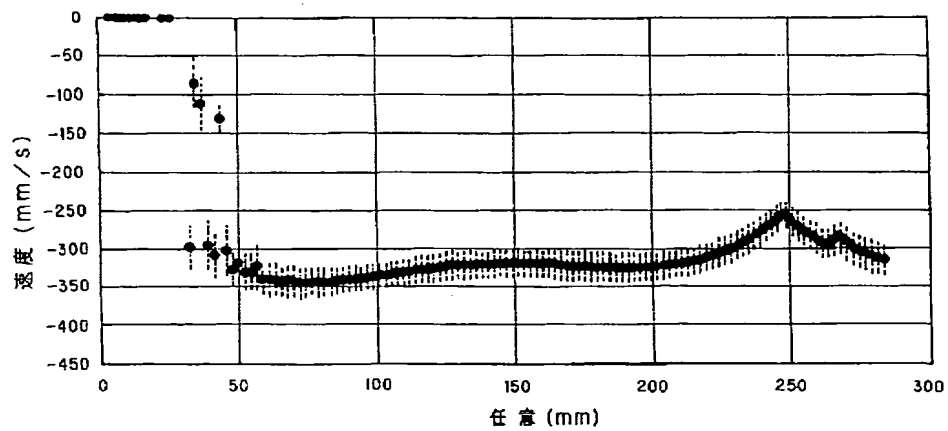
【図6】

Transient flow rate in a pipe



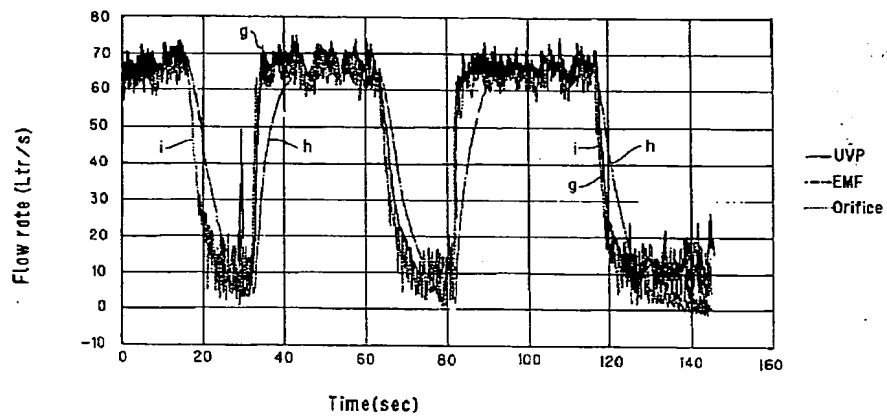
【図9】

Velocity profile



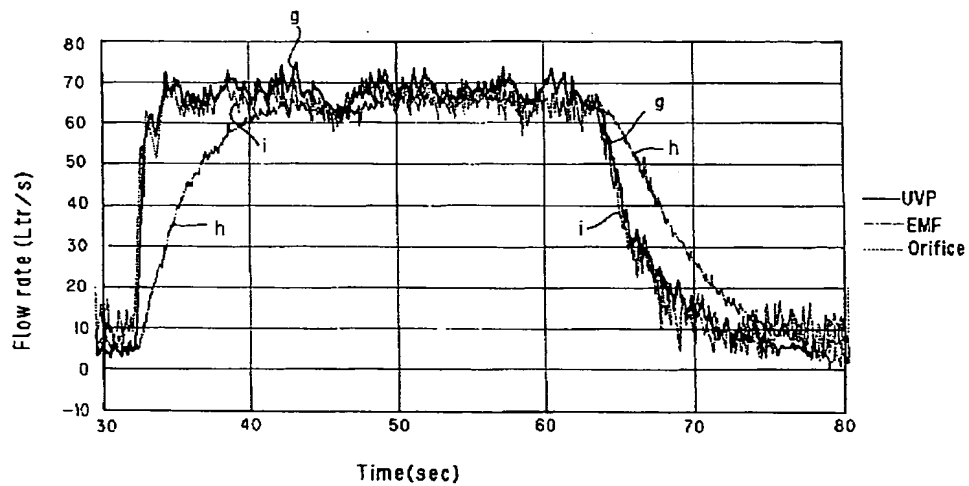
【図10】

Transient flow rate(comparison)

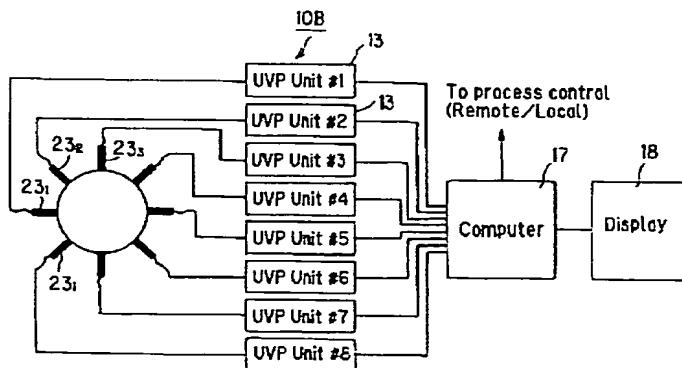


【図11】

Transient flow rate(comparison)



【図12】



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record.**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☒ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**